# Revisão da literatura em diferentes áreas da engenharia

Organizadores

Geany Targino de Souza Pedrosa
Georgiana Maria Vasconcelos Martins
Josiane Dantas Costa
Jussara Silva Dantas
Lídia Paloma da Silva Nogueira
Lílian de Queiroz Firmino
Rosinete Batista dos Santos Ribeiro
Shirley Waleska Cavalcante Araujo Silva
Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira
Thâmara Martins Ismael de Sousa



Editora Poisson

**Organizadores**
Geany Targino de Souza Pedrosa
Georgiana Maria Vasconcelos Martins
Josiane Dantas Costa
Jussara Silva Dantas
Lídia Paloma da Silva Nogueira
Lílian de Queiroz Firmino
Rosinete Batista dos Santos Ribeiro
Shirley Waleska Cavalcante Araujo Silva
Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira
Thâmara Martins Ismael de Sousa

# Revisão da literatura em diferentes áreas da engenharia

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2026

**Editor Chefe:** Dr. Darly Fernando Andrade

**Conselho Editorial**
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
Ms. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
Ms. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P283r
Revisão da Literatura em diferentes áreas da engenharia / Organização: Geany Targino de Souza Pedrosa, Georgiana Maria Vasconcelos Martins, Josiane Dantas Costa , Jussara Silva Dantas *et al.* – Belo Horizonte MG: Editora Poisson, 2026. 120 p.

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-673-8
DOI: 10.36229/978-65-5866-673-8
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Ensino. 1. PEDROSA, Geany Targino de Souza 2. MARTINS, Georgiana Maria Vasconcelos 3. COSTA, Josiane Dantas 4. DANTAS, Jussara Silva 5. Título

CDD-620

SÔNIA MÁRCIA SOARES DE MOURA – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterada.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

# *Autores e Organizadores*


**Geany Targino de Souza Pedrosa**

Professora Adjunta da Unidade Acadêmica de Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande UATA/CCTA/UFCG.

**Georgiana Maria Vasconcelos Martins**

Professora Associada da Unidade Acadêmica de Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande UATA/CCTA/UFCG.

**Josiane Dantas Costa**

Pesquisadora e Pós-doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande PPGEM/CCT/UFCG.

**Jussara Silva Dantas**

Professora Associada da Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal do Centro de Saúde e Tecnologia Rural da Universidade Federal de Campina Grande CSTR/UFCG.

**Lídia Paloma da Silva Nogueira**

Pesquisadora e Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

**Lílian de Queiroz Firmino**

Pesquisadora e Doutoranda na Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão dos Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande.

**Rosinete Batista dos Santos Ribeiro**

Professora Associada da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande UACTA/CCTA/UFCG.

**Shirley Waleska Cavalcante Araujo Silva**

Professora Adjunta da Unidade Acadêmica de Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande UAEQ/CCT/UFCG.

**Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira**

Professora Associada da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande UACTA/CCTA/UFCG.

**Thâmara Martins Ismael de Sousa**

Professora Adjunta da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande UACTA/CCTA/UFCG.

# *Prefácio*

Este e-book dedicamos aos nossos alunos de Graduação: José Antônio Ferreira de Almeida Rêgo (Engenharia civil), Israele Mangueira Juca Gomes (Engenharia Ambiental), Diogo Bernardo Nascimento (Engenharia Cívil), Cecília Mayane Sena de Araújo (Engenharia de Alimentos), Elis Marina Conceição Linhares Silva (Engenharia Química) e Ivna Ellen de Lucena Paulino Bandeira (Engenharia Química), que iniciaram a sua escrita acadêmica sob a nossa orientação, seus aprendizados na escrita acadêmica estão expressos neste e-book com uma forma de prestigiar os seus esforços nesta jornada acadêmica que foi iniciada a partir da escrita de suas monografias em formato de revisão de literatura para a conclusão dos cursos de Graduação em Engenharia de Alimentos (UATA/CCTA/UFCG), Engenharia Civil (UACTA/UFCG) e Engenharia Ambiental (UACTA/UFCG) e Engenharia Química (UAEG/CCT/UFCG). Desejo aos nossos alunos sucesso durante a jornada profissional e pessoal.

São os sinceros votos das pesquisadoras e professoras organizadoras deste e-book.

# SUMÁRIO

**Capítulo 1:** Conformidade da rotulagem de produtos lácteos e não lácteos com a legislação: uma revisão ..... 08

Cecília Mayane Sena de Araújo, Georgiana Maria Vasconcelos Martins, Geany Targino de Souza Pedrosa, Lidia Paloma da Silva Nogueira

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.01

**Capítulo 2:** Influência dos aditivos e cargas reforçantes nas propriedades dos elastômeros para uso em calçados: revisão bibliográfica ..... 19

Elis Marina Conceição Linhares Silva, Jacqueline do Carmo Barreto, Laércio Gomes de Oliveira, Shirley Waleska Cavalcante Araújo Silva

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.02

**Capítulo 3:** Análise do desempenho térmico de resíduos agrícolas na aplicação em isolamento térmico de edificações: uma revisão sistemática ..... 33

José Antônio Ferreira de Almeida Rêgo, Georgiana Maria Vasconcelos Martins, Rosinete Batista dos Santos Ribeiro, Josiane Dantas Costa

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.03

**Capítulo 4:** A fitorremediação no tratamento de efluentes contaminados com metais pesados: uma revisão sistemática..... 45

Israele Mangueira Juca Gomes, Georgiana Maria Vasconcelos Martins, Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira, Thâmara Martins Ismael de Sousa, Jussara Silva Dantas

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.04

**Capítulo 5:** Detecção das manifestações patológicas em alvenaria e estruturas de concreto por meio da análise de termografia infravermelha - uma revisão narrativa 59

Anderson Victor Cabral Dantas, Georgiana Maria Vasconcelos Martins, Shirley Waleska Cavalcante Araujo Silva

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.05

**Capítulo 6:** Análise dos impactos causados por agrotóxicos na saúde dos trabalhadores rurais no Brasil – uma revisão narrativa..... 72

Erick Roque Santana de Araujo, Alex Pereira de Sousa, Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira, Georgiana Maria Vasconcelos Martins, Jussara Silva Dantas

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.06

# SUMÁRIO

**Capítulo 7:** Análise comparativa de *wetlands* construídos para tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras ..... 84

Diogo Bernardo Nascimento, Rosinete Batista dos Santos Ribeiro, Lílian de Queiroz Firmino, Georgiana Maria Vasconcelos Martins

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.07

**Capítulo 8:** Eletrosíntese da liga Ni-Mn para produção de hidrogênio via eletrólise: uma revisão sistemática da literatura (2015–2025) ..... 104

Ivna Ellen de Lucena Paulino Bandeira, Josiane Dantas Costa, Larissa Gomes de Farias, Ana Regina Nascimento Campos, Renato Alexandre Costa de Santana

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-673-8.CAP.08

# Capítulo 1

## Conformidade da rotulagem de produtos lácteos e não lácteos com as legislação: uma revisão

*Cecília Mayane Sena de Araújo*
*Georgiana Maria Vasconcelos Martins*
*Geany Targino de Souza Pedrosa*
*Lidia Paloma da Silva Nogueira*

Resumo: Diversos estudos apontam não conformidades dos rótulos de produtos lácteos e não lácteos em relação às leis brasileiras, especialmente quanto à ausência de informações obrigatórias exigidas pelas Resoluções de Diretorias Colegiadas (RDCs), o que comprometem o direito à informação dos consumidores e a segurança alimentar. O objetivo do estudo foi analisar, com base na literatura existente e na legislação vigente, a conformidade das informações presentes nos rótulos de produtos lácteos e não lácteos, avaliando sua clareza e precisão para o consumidor. A metodologia adotada consiste em um levantamento bibliográfico, apoiado na abordagem PRISMA (Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises), com o intuito de aprimorar o relato das revisões. Foram pesquisados artigos publicados entre 2019 e 2023, utilizando as bases de dados do Google Acadêmico e do Portal de Periódicos da CAPES. Para a busca foram utilizadas as palavras-chave: rotulagem, iogurte e legislação. Como critérios de exclusão, foram desconsiderados artigos que não estavam incluídos no intervalo de tempo determinado e publicações em idiomas diferentes do português. Após a análise dos resumos, foram inicialmente identificados 15 artigos relevantes para o tema, dos quais 5 foram selecionados para a revisão detalhada. Os estudos analisados identificaram diversas não conformidades em rótulos de produtos lácteos e não lácteos, especialmente relacionadas à ausência de informações obrigatórias (lista de ingredientes, origem do produto, medidas caseiras, informações nutricionais), uso inadequado de alegações e falhas na legibilidade. Essas irregularidades comprometem a transparência e a segurança alimentar do consumidor. Os resultados evidenciam falhas recorrentes na rotulagem e reforçam a necessidade de maior fiscalização e adequação por parte da indústria alimentícia.

Palavras-chave: Alimentos industrializados, irregularidades, informações obrigatórias em rótulos, abordagem PRISMA.

## 1. INTRODUÇÃO

A rotulagem de alimentos no Brasil teve início na década de 1960 e tornou-se obrigatória no final dos anos 1990, com a criação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). A rotulagem é definida como a descrição na embalagem que visa fornecer informações regulamentadas, auxiliando o consumidor em escolhas mais adequadas, considerando preparo, processamento, armazenamento e características nutricionais. De acordo com as resoluções RDC nº 259/2002, Instrução Normativa (IN) nº 75, de 8 de outubro de 2020, RDC nº 259/2002 e Lei n° 10.674/2003, entre as informações obrigatórias estãos a denominação de venda do produto, lista de ingredientes, conteúdos líquidos, identificação da origem, nome ou razão social, lote, prazo de validade, adição de substâncias que causam alergias, informações sobre presença de glutén, tabela de informação nutricional, rotulagem nutricional frontal quando quantidades de açúcares adicionados, gorduras saturadas ou sódio sejam iguais ou superiores aos limites definidos pela IN nº 75, de 8 de outubro de 2020.

No Brasil, a legislação estabelece as diretrizes para os rótulos de alimentos, que são estabelecidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), ANVISA, vinculada ao Ministério da Saúde, e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Esses órgãos garantem que as informações contidas nos rótulos de produtos alimentares de origem animal, como por exemplo o leite e derivados, cumpram os critérios exigidos para a segurança e a qualidade dos alimentos (Pinheiro; Delarmelinda, 2023).

Leite e derivados são produtos bastante consumidos no Brasil. Segundo a Embrapa a produção de leite no Brasil alcançou 35,57 bilhões de litros em 2023 e o consumo anual chega a 180 litros/habitante. Um dos principais fatores de inquietação entre os consumidores em relação ao uso do leite e derivados está associado ao aumento global nos diagnósticos de alergias e intolerâncias alimentares observados nos últimos anos (Zieglmayer *et al.,* 2022; Hanauer, 2019). A incapacidade de digerir a lactose afeta aproximadamente 70% a 75% da população mundial, variando conforme a origem étnica de cada indivíduo (Hanauer, 2019). Por isso, Os rótulos de produtos sejam, lactéos ou não lactéos, que contêm componentes alérgenos em sua composição, ou substâncias que podem ser rejeitadas por determinados organismos, tendem a ser observados com maior atenção pelos consumidores (Callegaro, 2016; ANVISA, 2015).

O estudo dessas informações é de grande relevância, considerando que ainda há muitas dúvidas por parte da população sobre o tema. Para a realização de estudos como este, podem ser empregadas diversas metodologias, como a aplicação de checklists em produtos ou, ainda, o uso do protocolo PRISMA. O método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta- Analyses) é uma diretriz essencial para a elaboração e transparência de revisões sistemáticas, proporcionando um padrão detalhado de etapas que devem ser seguidas para garantir a consistência e a clareza do processo de revisão. O método PRISMA, inicialmente criado em 2009, e atualizado em 2020, tem como objetivo auxiliar pesquisadores na comunicação integral dos métodos e resultados de suas revisões sistemáticas, levando em consideração os avanços metodológicos e tecnológicos (Page, 2022).

A realização de uma revisão de literatura sobre a conformidade dos rótulos de alimentos lácteos e não lácteos, a fim de detectar padrões de irregularidades recorrentes e verificar a aderência as legislações vigentes. Esta análise tem como objetivo entender os efeitos dessas inadequações na segurança alimentar e no direito à informação do

consumidor, além de fundamentar a necessidade de melhorias na fiscalização e na rotulagem. Além disso, possibilitam a comparação entre diferentes categorias de produtos, fortalecendo a análise crítica e a relevância do tema.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. ROTULAGEM DE ALIMENTOS

A rotulagem de alimentos constitui uma ferramenta estratégica do Ministério da Saúde e da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), desenvolvida com o objetivo de proporcionar aos consumidores informações claras e objetivas sobre os alimentos embalados. Essa medida visa promover o acesso a uma alimentação mais adequada e segura, garantindo a transparência quanto aos ingredientes utilizados na formulação e contribuindo para a redução das taxas de obesidade, além de prevenir o consumo de substâncias potencialmente prejudiciais por pessoas com alergias ou intolerâncias alimentares (Menezes; Carmo, 2022).

Segundo Pagliai *et al.*, (2021) nos Estados Unidos, Canadá e Reino Unido, o consumo de alimentos ultraprocessados — como salsichas, cereais matinais, salgadinhos, pratos congelados, refrigerantes e bebidas alcoólicas destiladas — corresponde a cerca de 50% a 60% do valor energético total da dieta habitual da população. Concomitantemente, observa-se o aumento da prevalência de obesidade e de doenças crônicas não transmissíveis em diversos países, o que sugere uma associação entre o elevado consumo desses alimentos e o risco de desenvolvimento da obesidade. Essa tendência também é observada no contexto brasileiro, onde, além do aumento da obesidade e das doenças crônicas, verificam-se ainda problemas relacionados às alergias alimentares (Louzada et al., 2023).

Lopes *et al.,* (2022) relata em seu estudo sobre rotulagem de alérgenos alimentares embalados no Brasil que a prevalência de alérgicos no Brasil é de 5% dos adultos e 8% das crianças com alergias alimentares. Embora mais de 160 alimentos possam causar reações alérgicas, oito deles são alérgenos significativos (como leite de vaca, soja, ovos, trigo, peixes e crustáceos, amendoim e nozes). Esses alimentos são responsáveis por 90% das reações alimentares, principalmente em crianças.

Portanto, observa-se que a rotulagem de alimentos exerce influência direta na saúde e na segurança do consumidor, sendo fundamental avaliar se os produtos comercializados atendem às exigências legais. Essa análise é especialmente relevante no contexto dos produtos lácteos e não lácteos, em que falhas de rotulagem podem comprometer a transparência e a confiança do consumidor.

### 2.2. PRODUTOS LÁCTEOS E NÃO- LÁCTEOS

De acordo com a Embrapa (2021), produtos lácteos são aqueles que têm o leite como principal componente em sua composição. Essa categoria abrange leite fluido pasteurizado ou esterilizado, leite desnatado, manteiga, creme de leite, queijos, ricota, requeijão, iogurte, doces e bebidas lácteas. Esses produtos possuem elevado valor nutricional, sendo fontes importantes de proteínas de alto valor biológico, cálcio, vitaminas e outros micronutrientes essenciais à saúde humana. Porém muitas pessoas tem algum tipo de restrição a esses produtos.

Os alimentos com restrição de lactose são elaborados com o objetivo de reduzir ou eliminar a lactose — um açúcar naturalmente presente no leite — tornando-os adequados para indivíduos com intolerância à lactose, condição caracterizada pela dificuldade de digerir esse carboidrato. Segundo a legislação brasileira (Brasil, 2017), esses alimentos são classificados em duas categorias: isentos de lactose e com baixo teor de lactose, conforme a quantidade residual do açúcar presente no produto. Essa diferenciação é essencial para garantir a segurança e a informação adequada ao consumidor, sendo obrigatória a correta declaração no rótulo. Por outro lado, produtos não lácteos são aqueles que não contêm leite em sua composição, como café, gelatina, açúcar, arroz, geleias, bebidas vegetais e uma variedade de outros alimentos.

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de leite com uma produção que chega a 24 bilhões de litros inspecionados em 2023. As regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste são as regiões que apresentam maior volume de produção, principalmente Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás, Santa Catarina (Embrapa, 2024). O setor lácteo possui papel fundamental na segurança alimentar da população, uma vez que seus produtos fornecem nutrientes essenciais à saúde e estão disponíveis em diversas formas no mercado consumidor (Hanauer, 2019). Com relação aos produtos não lácteos, o consumo de arroz e café chegaram a 519,9 e 21,91 milhões de toneladas na safra de 2023/2024, respectivamente e o de açúcar 180,75 milhões de toneladas em 2024/2025 (Embrapa, 2024).

## 2.3. LEGISLAÇÕES E REGULAMENTAÇÕES APLICAVÉIS

A RDC nº 360/2003 da ANVISA define as normas obrigatórias para a rotulagem nutricional de alimentos embalados, que inclui a declaração de valor energético e nutrientes como carboidratos, proteínas, gorduras totais, saturadas e trans, fibra alimentar e sódio. Os dados devem ser apresentados por porção e percentual de valores diários (%VD). A norma também estabelece diretrizes para a exibição dos dados, padronização das porções e critérios para alimentos que não necessitam de declaração nutricional (Brasil, 2003a).

A RDC nº 259/2002 da ANVISA estabelece normas para a rotulagem de alimentos embalados, garantindo informações transparentes e padronizadas. Determina que os rótulos devem necessariamente incluir a identificação do produto, lista de ingredientes, conteúdo líquido, identificação da origem, lote, data de validade e as recomendações para conservação. Também requer a declaração nutricional quando necessário e proíbe informações enganosas ou que induzam o consumidor ao erro. Além disso, controla a legibilidade e a linguagem das informações, garantindo sua compreensão pelo público (Brasil, 2002).

A Resolução da Diretoria Colegiada nº 359/2003 da ANVISA define as porções padrão dos alimentos embalados para fins de rotulagem nutricional. Ela estabelece a quantidade recomendada de consumo para variadas categorias de alimentos e serve como referência para a declaração dos valores nutricionais nos rótulos. A legislação determina que as informações nutricionais devem ser fornecidas por porção, levando em conta medidas caseiras para simplificar a compreensão do consumidor. Adicionalmente, determina que os valores nutricionais devem ser arredondados de acordo com padrões estabelecidos (Brasil, 2003b).

Em 2020, foi instituída a Instrução Normativa (IN) nº 75, de 8 de outubro de 2020, que estabelece os requisitos técnicos para a declaração da rotulagem nutricional em alimentos embalados. Essa normativa atualiza as disposições da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 359/2003 e da RDC nº 259/2002, além de definir critérios para a indicação de teores elevados de sódio, açúcares adicionados e gorduras saturadas.

A RDC nº 26/2015 institui a exigência da identificação de alergênicos em alimentos, incluindo ingredientes como leite, ovos, glúten, soja, amendoim, castanhas, peixe e crustáceos. Determina o padrão de rotulagem para informar consumidores sobre possíveis riscos. Estabelece normas para alertar sobre contaminação cruzada quando existir possibilidade de vestígios desses ingredientes. Também define regras para o tamanho, destaque e visibilidade das informações, assegurando a clareza na comunicação dos alergênicos nos rótulos de produtos alimentícios (Brasil, 2025).

A RDC nº 135/2017 da ANVISA regulamenta alimentos destinados a dietas com restrição de lactose. Define categorias como "isentos de lactose" (≤100 mg/100 g ou ml) e "baixo teor de lactose" (>100 mg e ≤1 g/100 g ou ml), impondo declarações obrigatórias nos rótulos, como "sem lactose" ou "baixo em lactose", próximas ao nome comercial. Determina que a informação nutricional deve ser fornecida por 100g ou ml do produto, seja na versão para venda ou pronta para consumo, incluindo os teores de lactose e galactose. Exige que a redução de lactose seja comprovada por análises de controle de qualidade e validação do processo produção, com documentação disponível para autoridades sanitárias (Brasil, 2017).

A RDC nº 2/2007 define as normas técnicas para a utilização de aromatizantes em alimentos. A norma estabelece os tipos de aromatizantes permitidos (naturais, idênticos aos naturais e artificiais) e suas condições de uso, visando garantir a proteção do consumidor. O rótulo deve indicar claramente a presença de aromatizante, com a descrição de sua natureza. A resolução segue diretrizes do Codex Alimentarius e busca padronizar o uso desses aditivos no Brasil. Além disso, veta o uso de substâncias que possam representar risco à saúde. A norma também exige a declaração da função tecnológica do aromatizante no rótulo.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. ESTRATÉGIA DA PESQUISA

Este trabalho foi desenvolvido com base nas diretrizes dos *Itens de Relatório Preferidos para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises* – PRISMA (PRISMA, 2020). Os artigos utilizados como referência para este estudo foram obtidos no Portal de Periódicos da CAPES (CAPES, 2025) e no Google Acadêmico, abrangendo publicações entre 2019 e 2023. Na busca, foram empregadas as seguintes palavras-chave: “Legislação”, “Iogurte” e “Rotulagem”, combinadas com o operador booleano “AND”. Para refinar os resultados, aplicaram-se filtros como “Pesquisar páginas em português”, “Período específico”, “Ordenar por relevância” e “Acesso aberto”.

### 3.2. ANÁLISE DOS ESTUDOS

Foram incluídos estudos publicados entre 2019 e 2023, redigidos exclusivamente em língua portuguesa, que apresentassem em seus títulos ao menos uma das palavras-chave utilizadas e que abordassem a importância da conformidade dos rótulos de

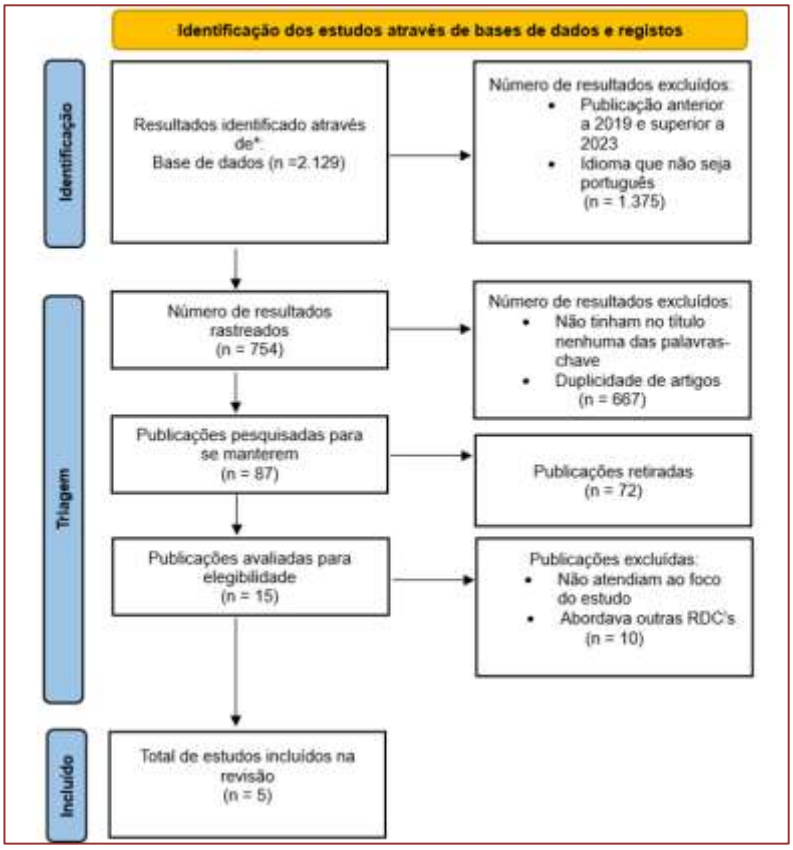
produtos lácteos e não lácteos com as legislações vigentes — RDC nº 259/2002, RDC n 26/2015, RDC n° 135/2017 e RDC n° 2/2007. Os trabalhos analisaram parâmetros como a presença das informações obrigatórias e a adequação dos rótulos às normas estabelecidas pela ANVISA. Foram excluídos os estudos que não verificaram a conformidade dos rótulos com base em critérios normativos ou que não destacaram as resoluções e instruções normativas mencionadas acima.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. RESULTADOS

A busca pelos termos “rotulagem”, “iogurte” e “legislação” resultou inicialmente em 2.129 resultados. Com a aplicação de filtros como, em idioma português, período de publicação, acesso aberto e ordenação por relevância, o número foi reduzido para 754 resultados. Na etapa seguinte foi realizada a leitura dos títulos, sendo excluídos 670 artigos que abordavam assuntos de outra campo de pesquisa, não relacionados à conformidade da rotulagem de produtos lácteos e não lácteos. Dos 87 restantes, após análise dos resumos, 15 artigos mostraram-se relevantes ao tema da pesquisa. Esses 15 artigos foram lidos na íntegra, e 5 foram selecionados por atenderem aos critérios estabelecidos. Esses trabalhos discutem a conformidade e as não conformidades dos rótulos de alimentos com base nas normas da ANVISA. As etapas de seleção estão ilustradas no Fluxograma 1:

**Fluxograma 1.** Fluxograma de literatura pesquisada




Fonte: elaborado pelos próprios autores.

**Quadro 1.** Resumos dos parâmetros por estudos

| Número | Autores | Metodologia | Produtos avaliados | Legislação utilizada (RDC) | Análise estatística |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Monteiro e Tiecher (2022) | Check-list | Lácteos isentos de lactose | nº 259/02, nº 359/03, nº 360/03, nº 26/15 e nº 135/17 | Sim |
| 2 | Silva e Nascimento (2021) | Check-list | Lácteos e não lácteos | nº 259/02 e nº 360/03 | Sim |
| 3 | Melo *et al.* (2020) | Check-list | Lácteos | nº 259/02 e nº 360/03 | Sim |
| 4 | Almeida e Azevedo (2023) | Check-list | Lácteos isentos de lactose | nº 259/02, nº 359/03, nº 360/03, nº 26/15, nº 135/17 e nº 2/07 | Sim |
| 5 | Silveira *et al.* (2022) | Check-list | Lácteos e não lácteos | nº 259/02, nº 359/03, nº 360/03, nº 26/15 e nº 135/17 | Não |

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Monteiro e Tiecher (2022) avaliaram 37 rótulos de produtos com restrição à lactose. De acordo com o estudo, 18,9% dos rótulos apresentaram não conformidades com a RDC nº 259/02 por utilizarem alegações não permitidas, como efeitos terapêuticos. Somente 2,7% dos itens não traziam a denominação de venda no painel principal. No que diz respeito à lista de ingredientes, todos os rótulos estavam presentes, porém uma bebida láctea apresentou uma ordem incorreta, que deve ser apresentada em ordem decrescente, do ingrediente majoritário da composição do produto para o ingrediente minoritário. Em relação a declaração de aditivos, foram identificadas irregularidade em 10% dos rótulos. Quanto ao lote, 24% dos rótulos não apresentaram a letra "L" antes do código. A informação nutricional estava em desacordo em 19% quanto disposição e o realce, as informações nutricionais estavam apresentadas junto a textos relacionados a outras informações obrigatórias, e além disso, o amido estava apresentado na tabela nutricional antes dos açúcares o que é incorreto de acordo com a RDC nº 360/03 e 92% dos rótulos não indicaram a medida caseira. Por outro lado, 100% dos produtos atenderam às exigências da RDC nº 26/15 quanto à declaração de alergênicos e à RDC nº 135/17 quanto à rotulagem de lactose.

Silva e Nascimento (2021) verificaram a conformidade de 102 rótulos de alimentos infantis lácteos e não lácteos, incluindo biscoitos doces, biscoitos salgados, cookies, doces, salgadinhos, bebida láctea, iogurte/danone, queijo, entre outros produtos, com base nas RDC nº 360/03 e nº 259/2002. As principais falhas foram notadas na identificação do país de origem, avisos no painel principal, identificação do lote, presença de corantes e aromatizantes, recomendações de conservação e ingredientes compostos. Os produtos mais irregulares foram doces (14 rótulos), biscoitos doces (5) e salgadinhos (4). Na RDC nº 360/03 a taxa de inconformidade foi menor, mas nenhum item estava 100%. A maior inadequação foi na presença da tabela nutricional, com 21,4% de irregularidades nos doces e 27,3% nos iogurtes, respectivamente. A menor ocorrência de não conformidades ocorreu na declaração do valor energético e quantidade de nutrientes. A pesquisa ressalta

a influência dos rótulos na escolha alimentar e enfatiza a necessidade de uma regulamentação mais rigorosa, especialmente para o público infantil.

Melo *et al.* (2021) verificaram 16 rótulos de produtos lácteos e foi constatado que 94% dos produtos examinados apresentaram pelo menos uma não conformidade em relação à RDC nº 259. O requeijão foi o produto que apresentou maior irregularidade (43%), seguido das bebidas lácteas achocolatadas (25%) e sabor morango (18%), e do iogurte (14%), o mais conforme. O requeijão destacou-se por erros na lista de ingredientes, aditivos e condições de armazenamento. As bebidas lácteas apresentaram erros no prazo de validade e conteúdo líquido. Quanto à RDC nº 360, foram encontradas falhas em informações referentes ao valor energético, informações gerais sobre porções, a bebida láctea sabor morango apresentou maior percentual de não conformidades (37%), enquanto o requeijão RD foi o único produto totalmente conforme. As principais falhas envolveram ausência de informações sobre vitaminas e minerais (26,5%), unidades de medida (12,24%), quantidade de açúcares (10,2%) e tamanho mínimo das informações para melhor legibilidade (8,16%).

Silveira *et al.* (2022) analisaram 100 rótulos de produtos destinados ao público infantis e constataram que, exceto hambúrgueres, todos mostraram algum desacordo com a legislação brasileira. A principal irregularidade foi a legibilidade inadequada das informações obrigatórias, como a declaração nutricional. Vários rótulos também não incluíram a frase exigida sobre necessidades energéticas. Por outro lado, todos declararam corretamente a presença ou ausência de glúten. Foram identificadas inadequações na composição nutricional, particularmente nos teores de sódio, açúcares livres e gorduras saturadas.

Almeida e Azevedo (2023) averiguaram 50 rótulos de produtos lácteos com base nas RDC's: 259/02, 359/03, 360/03, 26/15 e 135/17. Eles identificaram inadequações nos rótulos devido à ausência de negrito na declaração dos ingredientes alergênicos (RDC nº 26/15), e falhas na tabela nutricional (RDC nº 135/17), em 5% dos rótulos, a informação nutricional declarada para 100g do produto, não estava presente. Ademais, 66% dos rótulos não continham medida caseira na informação nutricional (RDC nº 360/03), e apenas 4% identificaram corretamente a origem do produto (RDC nº 259/02). Aproximadamente 48% usaram expressões que podem induzir o consumidor a erro, podendo levar o consumidor acreditar que o produto apresenta propriedades medicinais ou terapêuticas. O maior índice de inadequação foi relacionado à RDC nº 359/03, com 60% sem medida caseira na porção, contendo somente a gramatura. Apesar das falhas, todos os rótulos indicaram as quantidades de lactose e galactose e exibiram a declaração sobre alergênicos em um local de fácil visibilidade, porém em 2 dos rótulos a declaração para alergênicos não estava em negrito, não estando de acordo com a legislação.

## 4.2. DISCUSSÕES

A aderência dos rótulos de alimentos lácteos e não lácteos à legislação em vigor é fundamental para assegurar informação clara, segura e de fácil acesso ao consumidor. Vários estudos demostram que, mesmo com as regulamentações legais impostas pelas rdc's nº 259/02, nº 360/03 e nº 135/17 da anvisa, ainda persistem inconsistências em itens básicos de rotulagem, prejudicando a eficácia do rótulo como ferramenta de orientação e defesa do consumidor.

No trabalho de Monteiro e Tiecher (2022), que analisou categorias de produtos lácteos sem lactose, constatou-se que todos os rótulos avaliados estavam em conformidade com a rotulagem obrigatória de alergênicos, atendendo aos critérios estabelecidos pela rdc nº 26/15 e em relação ao destaque em caixa alta, negrito e cor contrastante. Este resultado se opõe aos resultados de Almeida e Azevedo (2023), que identificaram falhas principalmente no destaque visual dessas informações. Monteiro e Tiecher (2022) também constataram irregularidades na apresentação da informação nutricional em 19% dos produtos, bem como a falta de medida caseira em 92% dos rótulos de produtos para dietas com restrição de lactose, o que também foi relatado por Almeida e Azevedo (2023), que também notaram a omissão de medidas caseiras e de valores energéticos por porção.

Essas informações se alinham com os estudos de Melo *et al.* (2020), que, embora não avaliem produtos não lácteos, reforçam essas observações ao demonstrar que muitos produtos contêm informações nutricionais incompletas ou com formatação inadequada, foram encontradas falhas em informações referentes ao valor energético, informações gerais sobre porções com 6,12% de não conformidade . Além disso, a pesquisa indicou que alguns rótulos omitiram informações obrigatórias, como nos outros estudos, violando as normas da anvisa que visam proteger o direito à informação dos consumidores.

Silva e Nascimento (2021) detectaram falha quanto à ausência ou inadequação da lista de ingredientes e do número de lote, violando a rdc nº 259/02. Essas informações são fundamentais para garantir a segurança e rastreabilidade dos alimentos. Ao comparar com o estudo de Monteiro e Tiecher, observa-se semelhança nas falhas de rotulagem, especialmente no lote, onde 24% dos produtos apresentaram inconformidades. Contudo, diferentemente do estudo de Silva e Nascimento, Monteiro e Tiecher encontraram 100% de conformidade na presença da lista de ingredientes, porém uma bebida láctea apresentou uma ordem incorreta, o que torna os estudos com irregularidades semelhantes também na lista de ingredientes. A comparação indica que, embora existam avanços em alguns pontos, as falhas em informações obrigatórias continuam ocorrendo, evidenciando a necessidade de intensificar a supervisão e a responsabilidade das indústrias em atender às normas.

Por outro lado, a pesquisa de Silveira *et al.* (2022), embora tenha focado em produtos voltados para o público infantil, confirma um padrão já identificado por outros estudos, como Almeida e Azevedo (2023) e Melo *et al.* (2020), que destacam problemas constantes na legibilidade e ausência de informações obrigatórias nos rótulos. Da mesma forma que nos produtos lácteos e não lácteos analisados neste trabalho, foram observadas irregularidades em relação ao tamanho de fonte, ausência de frases requeridas por lei a e inadequações na tabela nutricional. A presença da declaração sobre glúten foi o único aspecto que foi atendido.

Comparando os cinco estudos, observa-se que tanto produtos lácteos quanto não lácteos apresentam falhas recorrentes nos mesmos pontos críticos: legibilidade do texto, ausência de frases obrigatórias, inconsistência nas informações nutricionais, uso incorreto de destaque para alergênicos e omissões na lista de ingredientes. Esta frequência indica não só a negligência das indústrias em cumprir a legislação em vigor, mas também deficiência na fiscalização sanitária e falta de penalidades mais eficazes por parte dos órgãos reguladores, como a anvisa e o mapa.

## 5. CONCLUSÃO

Considera-se pertinente o desenvolvimento de novos trabalhos que utilizem as resoluções mais atuais sobre a rotulagem de alimentos, a fim de fornecer uma análises mais alinhadas com o cenário regulatório vigente e suas constantes atualizações.

O estudo dos trabalhos revelou um cenário preocupante no que se refere à conformidade dos rótulos de produtos lácteos e não lácteos frente as legislações vigentes de rotulagem de alimentos no Brasil. As irregularidades mais frequentes identificadas foram: falta de ênfase nos alergênicos, falhas na apresentação da medida caseira, informações nutricionais incompletas, uso de alegações que podem induzir o consumidor a erro e ausência de informações obrigatórias como número do lote e prazo de validade.

Essas falhas comprometem a eficácia dos rótulos como um meio de comunicação entre a indústria e os consumidores, especialmente em relação à clareza, legibilidade e veracidade das informações apresentadas. Tais falhas dificultam a tomada de decisões alimentares seguras e conscientes, principalmente para aqueles com restrições alimentares, intolerâncias ou alergias, os quais necessitam de rótulos precisos e padronizados para garantir a segurança na sua alimentação.

Diante disso, é evidente a urgência de uma fiscalização mais rigorosa por parte dos órgãos competentes, como a ANVISA e o MAPA, e uma atuação responsável por parte da indústria alimentícia na elaboração de seus rótulos. É essencial que a rotulagem atenda à sua função legal e social, garantindo informações completas, legíveis e confiáveis, contribuindo assim para a promoção da saúde e a proteção dos direitos dos consumidores.

## REFERÊNCIAS

[1] BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução RDC n° 259, de 20 de setembro de 2002. **Regulamento técnico para rotulagem de alimentos embalados**. Brasília, DF: Poder Executivo, 2002.

[2] BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução RDC n° 359, de 23 de dezembro de 2003. **Regulamento técnico de porções de alimentos embalados para fins de rotulagem nutricional.** Brasília, DF: Poder Executivo, 2003a.

[3] BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução RDC n° 360, de 23 de dezembro de 2003. **Regulamento técnico sobre rotulagem nutricional de alimentos embalados.** Brasília, DF: Poder Executivo, 2003b.

[4] BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução RDC n° 26, de 2 de julho de 2015. **Dispõe sobre os requisitos para rotulagem obrigatória dos principais alimentos que causam alergias alimentares.** Brasília, DF: Poder Executivo, 2015.

[5] BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 135, de 8 de fevereiro de 2017. Altera a Portaria SVS/MS nº 29, de 13 de janeiro de 1998, que **aprova o regulamento técnico referente a alimentos para fins especiais, para dispor sobre os alimentos para dietas com restrição de lactose.** Brasília, DF: Poder Executivo, 2017.

[6] BRASIL. Ministério da Saúde. Resolução-RDC nº 2, de 15 de janeiro de 2007. **Regulamento Técnico sobre Aditivos Aromatizantes**. Brasília, DF: Poder Executivo, 2007.

[7] BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução RDC n° 26, de 2 de julho de 2015. **Dispõe sobre os requisitos para rotulagem obrigatória dos principais alimentos que causam alergias alimentares.** Brasília, DF: Poder Executivo, 2015.

[8] BRASIL.Instrução Normativa N° 75, de 8 de janeiro de 2020. **Estabelece os requisitos técnicos para declaração da rotulagem nutricional nos alimentos embalados.** Brasília, DF: Poder Executivo, 2020.

[9] BRASIL. Lei 10.674 de 16 de maio de 2003. **Obriga a que os produtos alimentícios comercializados informem sobre a presença de glúten.** Brasília, DF: Poder Executivo, 2003.

[10] CALLEGARO, William. **A responsabilidade civil da indústria de alimentos nas relações de consumo sob o enfoque da rotulagem como meio de acesso à informação**. 2016. 76f. Direito do consumidor e direito fundamentais- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

[11] SILVA, J. A.; DO NASCIMENTO, B. M. S. Análise da adequação de rótulos de alimentos infantis frente a rotulagem geral e nutricional. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 2, p. 6931-6941, março 2021.

[12] EMBRAPA. **Lácteos**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de. Acesso: 7 abr. 2025.

[13] EMBRAPA. **Lácteos**. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/ publicacao/1164754/anuario-leite-2024-avaliacao-genetica-multirracial. Acesso: 7 abr. 2025.

[14] HANAUER, D. C.; MERGEN, I. Legislação brasileira para rotulagem de produtos lácteos. **Brazilian Journal of Food Research**, Campo Mourão, v. 10, p. 171-199, agosto 2019.

[15] MONTEIRO, E.R; TIECHER, A. Avaliação da rotulagem de produtos lácteos isentos de lactose. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**,v.77, p. 92-102, abril-jun 2022.

[16] PAGE, M. J.; Moher, D. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, Washington, v.46, p. 20232022, Jun 2022.

[17] PINHEIRO, G. S. R.; DELARMELINDA, E. A. Uma breve abordagem das normas e legislações de alimentos no Brasil. Ciência e tecnologia de alimentos: o avanço da ciência no Brasil, São Paulo, v. 5, p. 314-330, outubro 2023.

[18] MENEZES, B. F.; CARMO, M. M. R. A importância da rotulagem alimentar e nutricional para a autonomia alimentar do consumidor.**Brazilian Journal of Development**, Paraná,v. 8, p. 23114-23116, abril 2022**.**

[19] PAGLIAI, G.; DINU, M.; MADARENA, M. P.; BONACCIO, M.; IACOVIELLO, L.; SOFI, F. Consumption of ultra-processed foods and health status: a systematic review and meta-analysis. British journal of nutrition, v. *125*, p. 308-318, Agosto 2021.

[20] LOUZADA, M. L. D. C.; CRUZ, G. L. D.; SILVA, K. A. A. N.; GRASSI, A. G. F.; ANDRADE, G. C.; RAUBER, F.; MONTEIRO, C. A. Consumption of ultra-processed foods in Brazil: distribution and temporal evolution 2008–2018. British journal of nutrition, v. *57*, p. 308-318, agosto 2020.

[21] LOPES, J.F.; CARVALHO, M.D.A.; MACHADO, N.C. Rotulagem de alérgenos alimentares nos grupos da pirâmide alimentar de alimentos embalados no Brasil: análise de descrições, ambiguidades e riscos. Revista Paulista de Pediatria, São Paulo, v. 40, p. e2021079, junho 2022.

[22] ZIEGLMAYER, U.P.; HEMMER, W.; WIESER, S.; HOFFMANN-SOMMERGRUBER, K. Intolerâncias alimentares – um desafio diagnóstico. **Allergo Journal Internacional**, Austria v. 31, p. 23-35, novembro 2022.

# Capítulo 2

## *Influência dos aditivos e cargas reforçantes nas propriedades dos elastômeros para uso em calçados: revisão bibliográfica*

*Elis Marina Conceição Linhares Silva*
*Jacqueline do Carmo Barreto*
*Laércio Gomes de Oliveira*
*Shirley Waleska Cavalcante Araújo Silva*

Resumo: Os compostos elastoméricos utilizados na indústria calçadista dependem de uma formulação precisa de cargas reforçantes e aditivos para alcançar propriedades desejáveis como resistência à abrasão, flexibilidade, leveza e durabilidade. Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica acerca da utilização de cargas reforçantes e aditivos em compostos elastoméricos de borracha natural (NR) e estireno-butadieno (SBR), voltados para uso na indústria de calçados. Assim, através de uma metodologia de revisão sistemática, utilizando as bases Google Scholar, Periódicos CAPES e SciELO Brasil, foram selecionados e avaliados 11 artigos relevantes com o tema abordado. Mediante a análise geral dos artigos selecionados, verificou-se uma maior concentração de pesquisas envolvendo borracha natural em relação à SBR. Notou-se também que as cargas reforçantes, em especial a carga carbonácea (CC) e a sílica, representaram maior frequência e são bastante relacionadas à otimização de propriedades, tais como resistência mecânica e processabilidade. Os aditivos citados nos trabalhos foram: enxofre, como agente de vulcanização, azodicarbonamida e bicarbonato de sódio, como esponjantes, e óleo parafínico como extensor. A análise integrada dos artigos evidenciou que as propriedades físico-mecânicas dos elastômeros não dependem de um único componente da formulação, mas da interação entre elastômero base, cargas reforçantes, aditivos e metodologia adotadas. Constatou-se, assim, que a seleção adequada dos elastômeros e aditivos é fundamental para equilibrar a performance físico-mecânica, conforto e durabilidade em calçados, enfatizando a necessidade de estudos comparativos para a obtenção de melhorias futuras nas formulações.

Palavras-chave: Compostos elastoméricos; borracha natural; SBR; indústria calçadista.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização do polímero cis-1,4-poli-isopreno, conhecido como borracha natural (NR), se popularizou no Brasil a partir do século XIX, durante o Ciclo da Borracha. No mesmo período, sua aplicação em solados de calçados ganhou força com a descoberta da vulcanização por Charles Goodyear, processo que conferiu maior resistência e durabilidade ao material (CRQ-SP, [s.d.]). Atualmente, a indústria calçadista configura-se como um dos principais segmentos consumidores desse composto elastomérico no país, principalmente pela ampla utilização da borracha natural (NR) e da borracha de estireno-butadieno (SBR) na fabricação de solados (POLIURETANOS.NET, [s.d.]). Essa relevância é confirmada por representantes do setor, como a Associação Brasileira das Indústrias de Calçados, que também enfatiza o avanço na utilização de materiais alternativos e sustentáveis na indústria (ABICALÇADOS, 2024).

Para os calçados apresentarem melhor conforto e durabilidade, são incorporados à matriz polimérica da borracha diversos aditivos e cargas reforçantes (CR). Essa combinação origina os compostos elastoméricos, que são responsáveis por potencializar o desempenho físico do material, especialmente propriedades como dureza, resistência à abrasão e flexibilidade. Além disso, o impacto dessas variáveis tem sido amplamente estudado em diferentes formulações para aplicação na indústria de calçados. De acordo com estudos realizados por Arguello e Santos (2016), ao se verificar misturas de borracha natural com borracha sintética (blenda), foi possível observar que a composição influencia diretamente o comportamento mecânico, como a resistência à compressão e também à dureza. Esses estudos reforçam a importância de compreender a relação entre formulação e desempenho, principalmente quando se leva em consideração as diferenças tanto na utilização quanto nas condições ambientais.

Além disso, estudos apontam que a concentração de agente esponjante (AE) — responsável por garantir a estrutura porosa da borracha — influência de forma direta a expansão e a densidade do composto, afetando a dureza e o desempenho mecânico. Tais evidências foram observadas na análise de Najib et al. (2009), constatando que o aumento da concentração de AE na NR viabiliza maior expansão e redução da densidade, mostrando a importância da padronização desses aditivos.

Diante do exposto, este trabalho visa discutir, por meio de uma revisão bibliográfica, o impacto dos aditivos e cargas reforçantes em borrachas NR e SBR utilizadas na indústria de calçados. Como objetivos específicos, tem-se:

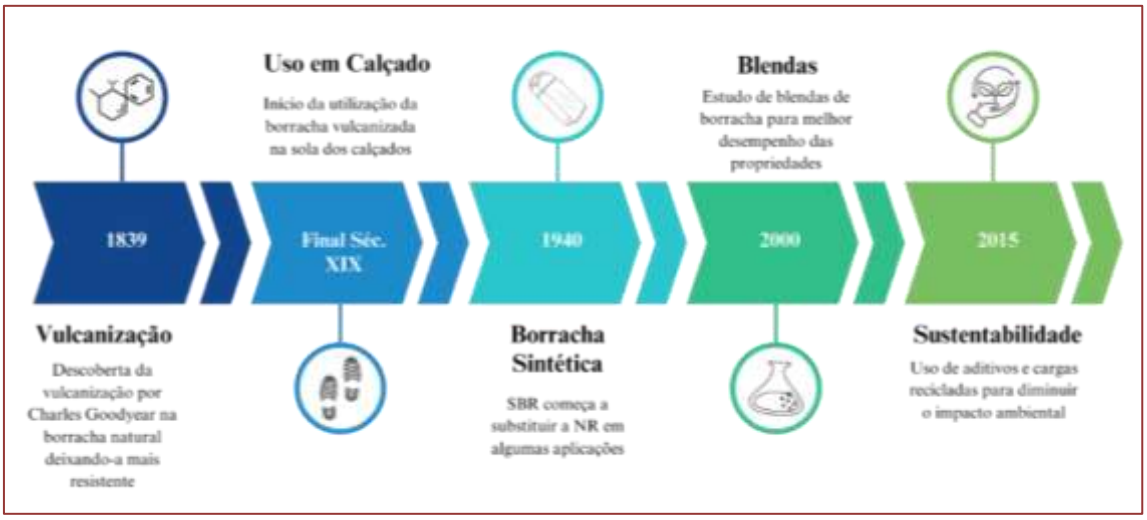
- Selecionar, em bases de dados disponíveis na internet, pesquisas relevantes que estudam a influência de cargas reforçantes e aditivos em compostos elastoméricos.
- Pesquisar na literatura os principais tipos de aditivos, como agentes de vulcanização (AV), agente esponjante, óleos extensores e aditivos auxiliares, utilizados em elastômeros.
- Avaliar, mediante os trabalhos pesquisados, as interações conjuntas entre cargas e aditivos sobre as propriedades físico-mecânicas dos elastômeros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS ELASTÔMEROS

Os compostos químicos conhecidos como polímeros possuem diversas classificações, dentre elas referente ao comportamento mecânico, onde encontra-se os elastômeros, que são compósitos de alta elasticidade e capacidade de deformação reversível, com ampla aplicabilidade industrial que requerem resistência mecânica, flexibilidade e durabilidade. Assim, dentre os mais utilizados, destacam-se a borracha natural (NR), obtida do látex da seringueira Hevea brasiliensis, e a borracha de estireno-butadieno (SBR), adquirida por meio da polimerização do estireno com o butadieno. Do mesmo modo esses elastômeros exibem propriedades físico-químicas que esclarecem a vasta aplicação em setores como a indústria de calçados. A seguir, a Figura 1 representa a linha do tempo com os principais marcos históricos sobre os avanços dos elastômeros naturais e sintéticos com destaque na indústria calçadista:

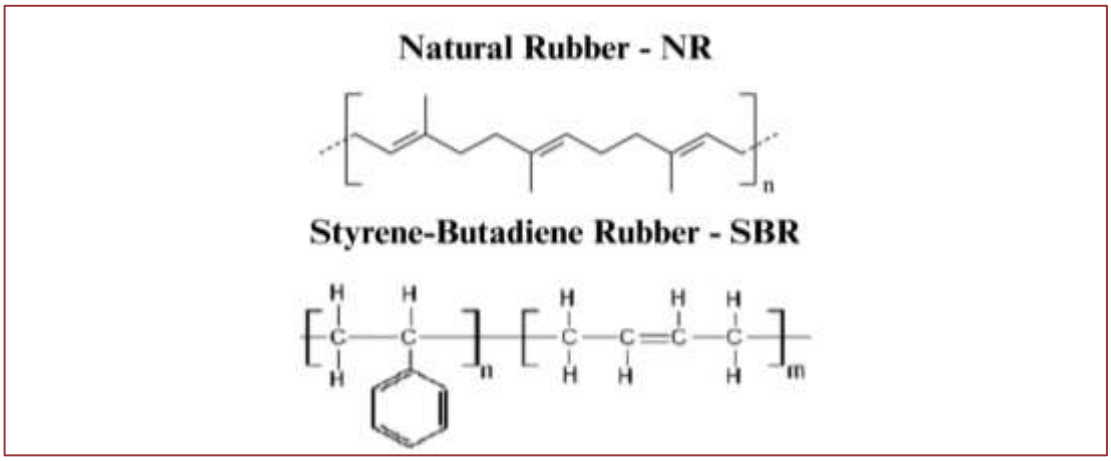
**Figura 1.** Linha do tempo dos avanços dos elastômeros e sua aplicação em calçados




Fonte: Adaptado de CRQ-SP [s.d], López (2015), Arguello e Santos (2016), Bu (2018), Rostami et al. (2023), Lu et al. (2020).

A saber, a NR é um polímero de nomenclatura cis-1,4-poli-isopreno, com reconhecimento por sua excelente elasticidade, boa resistência ao rasgo e elevada resiliência. No entanto, o poli(buta-1,3-dieno-co-estireno) copolímero de estireno e butadieno (SBR) , por ser uma borracha sintética, é mais eficiente no controle sobre sua composição e desempenho, concedendo ótimos atributos abrasivos e de estabilidade térmica, mesmo com menor elasticidade quando comparada à NR. Na Figura 2, tem-se uma representação do arranjo molecular da NR e da SBR, destacando a diferença estrutural entre elas:

**Figura 2.** Arranjo molecular da NR e da SBR




**Fonte:** Adaptado de Oshio (2020), Ciência e Tecnologia da Borracha [s.d].

Essas estruturas evidenciam que a NR possui um arranjo polimérico com elevado padrão de ligações cis, o que confere ao material maior elasticidade e resiliência. Em contrapartida, a SBR combina arranjos de estireno e butadieno em diferentes proporções, garantindo maior estabilidade térmica e resistência ao desgaste, porém, com menor elasticidade. Tais atributos são decisivos para a classificação dos elastômeros quanto a origem (natural ou sintético), cristalinidade (amorfo ou semicristalino) e comportamento térmico (termoplástico ou termoestável) (LÓPEZ, 2015).

Assim, entender a relação entre arranjo molecular e propriedades físico-mecânicas possibilita escolher o elastômero mais apropriado para cada aplicação. Haja vista, na indústria de calçados, a NR é bastante aplicada em solados e palmilhas por conferir conforto e flexibilidade, enquanto a SBR é escolhida em formulações que requerem maior resistência ao desgaste. Como resultado, uma técnica comum nesse setor é a utilização de blendas, que consistem na combinação de NR e SBR, de forma a otimizar o produto final conferindo a aderência das propriedades dos dois materiais.

## 2.2. PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS ALMEJADAS EM COMPÓSITOS ELASTOMÉRICOS

A seleção de elastômeros para a indústria calçadista depende do entendimento de propriedades físico-mecânicas que relacionam o desempenho e o conforto do produto final. Entre as principais propriedades destacam-se a dureza, a resistência à tração e à abrasão, a elasticidade, a resiliência e a expansão, as quais são influenciadas pela formulação, densidade de ligações cruzadas e tipo de vulcanização. A dureza deve ser controlada para equilibrar flexibilidade e resistência mecânica, enquanto a resistência à tração indica a capacidade do material de suportar esforços sem ruptura. A resistência à abrasão é essencial para solados, sendo afetada pelo grau de reticulação, que, em excesso, pode comprometer a flexibilidade. Já a elasticidade e a resiliência estão associadas à recuperação do material e à absorção de impacto, contribuindo para a redução da fadiga durante o uso. Por fim, a expansão influencia no peso e amortecimento, sendo particularmente relevante em aplicações que priorizam conforto e leveza.

## 2.3. ADITIVOS USADOS EM BORRACHAS: SUAS FUNÇÕES E CATEGORIAS

A performance final de um compósito elastomérico, além da boa escolha do elastômero, necessita também da correta seleção e proporção dos aditivos. Esses materiais tem papel característico que vão desde a alteração nas propriedades mecânicas até o aprimoramento de aspectos de processamento e longevidade do material (NEGRI, 2023; HIRANOBE, 2020). Seguidamente, os principais grupos de aditivos utilizados em formulações elastoméricas serão apresentados com ênfase na função e relevância na indústria de calçados.

### 2.3.1. AGENTES DE VULCANIZAÇÃO

Os agentes de vulcanização (AV) são encarregados de propiciar a formação de ligações cruzadas na cadeia polimérica, processo este que possibilita a obtenção de características como elasticidade, resistência mecânica e estabilidade térmica. O agente mais utilizado – enxofre – pode ser empregado em múltiplos mecanismos, como o convencional, eficiente ou semi-eficiente, de acordo com a aplicação desejada (SOUZA et al., 2018). Ainda por cima, outras substâncias são utilizadas além do enxofre, como peróxidos orgânicos e resinas fenólicas aplicadas em situações específicas, especialmente quando busca-se elevada resistência ao envelhecimento térmico (VACCIOLI, 2022).

### 2.3.2. ESPONJANTES

Os esponjantes, conhecidos também como expansores, são aplicados para reproduzir uma estrutura celular no interior da borracha, gerando materiais mais leves e com atributos de absorção de impacto e isolamento térmico. Com efeito, tais substâncias agem na liberação de gases durante o processo, aprisionando-os na matriz polimérica, gerando cavidades ou poros. Assim, compostos a base de azodicarbonamida, são largamente manipulados devido à alta eficiência e controle sobre o tamanho das células (NEGRI, 2023). Em virtude disso, a indústria calçadista aplica esses aditivos em formulações de solados e palmilhas para atingir critérios de conforto e redução de peso.

### 2.3.3. ADITIVOS AUXILIARES

Esses aditivos englobam substâncias que, mesmo não estando ligadas diretamente a vulcanização ou expansão do elastômero, conferem características fundamentais para otimizar o processo, garantir estabilidade e estética do produto final. Dentre eles, têm-se os antioxidantes, estabilizantes, plastificantes, pigmentos e agentes de processamento.

Hiranobe (2020), aborda que a presença de antioxidantes auxilia na preservação das propriedades mecânicas da borracha durante o uso, adiando o envelhecimento e prolongando a vida útil do produto. Os plastificantes também contribuem para a flexibilidade e redução da dureza, enquanto os pigmentos atribuem cor e proteção contra radiação UV, expandindo as possibilidades de aplicação.

## 2.4. CARGAS REFORÇANTES EM ELASTÔMEROS

As cargas reforçantes são componentes incorporados às formulações elastoméricas com o objetivo de melhorar as propriedades físico-mecânicas, aumentar a durabilidade e adequar o desempenho dos compósitos às exigências industriais. Além do impacto técnico, essas cargas influenciam diretamente o custo do produto final, sendo determinantes para propriedades como dureza, resistência à abrasão e à tração, especialmente relevantes para a indústria calçadista (Souza et al., 2018; Vaccioli, 2022).

### 2.4.1. TIPOS DE CARGAS E COMO ATUAM

Entre as principais cargas reforçantes utilizadas em elastômeros destacam-se a carga carbonácea, a sílica e as argilas modificadas. A carga carbonácea é amplamente empregada como reforço tradicional em NR e SBR, promovendo aumento da resistência mecânica e à abrasão. A sílica surge como alternativa ou complemento, favorecendo a resistência à tração, elasticidade e redução da geração de calor, especialmente quando associada a agentes de acoplamento. Já as argilas modificadas apresentam potencial reforçante quando bem dispersas, contribuindo também para a redução de custos, sendo a etapa de mistura decisiva para o desempenho do compósito (Negri, 2023; Vaccioli, 2022; Camargo, 2025).

A eficiência dessas cargas está diretamente relacionada à interação com a matriz polimérica, à dispersão e à afinidade química, fatores que determinam o equilíbrio entre rigidez, flexibilidade e resistência mecânica do material.

### 2.4.2. EFEITOS COMBINADOS ENTRE CARGAS E ADITIVOS

O desempenho final dos compósitos elastoméricos depende da combinação equilibrada entre cargas reforçantes e aditivos, como agentes de vulcanização, plastificantes e antioxidantes. A densidade de ligações cruzadas formada durante a vulcanização influencia a interação entre cargas e matriz, podendo aumentar a rigidez ou preservar a flexibilidade do material. Dessa forma, a formulação adequada permite ajustar propriedades como conforto, resistência ao desgaste e estabilidade dimensional, aspectos essenciais para aplicações em calçados (Hiranobe, 2020).

## 2.5. ÓLEOS EXTENSORES: BORRACHA ESTENDIDA

A borracha estendida consiste na incorporação de óleos plastificantes à matriz elastomérica com o objetivo de reduzir custos, melhorar a processabilidade e controlar propriedades físico-mecânicas. Esses óleos atuam como diluentes, reduzindo a viscosidade do composto e favorecendo a dispersão de cargas e aditivos, sem comprometer significativamente propriedades como elasticidade, resistência à abrasão e estabilidade térmica (Delgado, 2011).

Embora amplamente estudada em aplicações como pneus, a borracha estendida apresenta benefícios relevantes para a indústria calçadista, especialmente em solados, ao proporcionar maior flexibilidade, resistência ao desgaste e redução de custos. Além disso, contribui indiretamente para a sustentabilidade ao diminuir o consumo de polímero puro, tornando-se uma alternativa estratégica para equilibrar desempenho, custo e processamento (Negri, 2023; Souza et al., 2018).

## 2.6. APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DOS COMPÓSITOS ELASTOMÉRICOS NA INDÚSTRIA DE CALÇADOS

Os compósitos elastoméricos à base de NR e SBR são amplamente utilizados na indústria calçadista, sobretudo em solados, entressolas e palmilhas, devido à combinação entre desempenho mecânico e conforto. A NR destaca-se pela elevada elasticidade e resiliência, enquanto a SBR contribui com maior resistência ao desgaste e estabilidade térmica, favorecendo a durabilidade dos calçados (Negri, 2023).

A utilização de blendas de NR e SBR possibilita ajustar propriedades como dureza, resistência à tração e à abrasão, ampliando a versatilidade do material. A incorporação de cargas reforçantes e aditivos específicos permite direcionar características funcionais, como controle de expansão, leveza, estabilidade dimensional e conforto, atendendo às demandas técnicas e estéticas do setor calçadista (Souza et al., 2018; Vaccioli, 2022).

## 3. METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica sistematizada, com foco na análise do impacto de aditivos e cargas reforçantes em elastômeros NR e SBR aplicados à indústria calçadista (Rother, 2007). A busca foi realizada nas bases Google Scholar, Periódicos CAPES e SciELO Brasil, utilizando combinações de palavras-chave em inglês relacionadas a elastômeros, propriedades físico-mecânicas e aplicações em calçados.

Foram selecionados artigos publicados entre 2015 e 2025, com acesso aberto, revisão por pares e abordagem experimental detalhada. Trabalhos voltados exclusivamente a pneus ou aplicações automotivas foram excluídos. Os dados extraídos incluíram material estudado, tipo de aditivo ou carga, propriedades analisadas e principais resultados, sendo organizados para análises quantitativa e qualitativa.

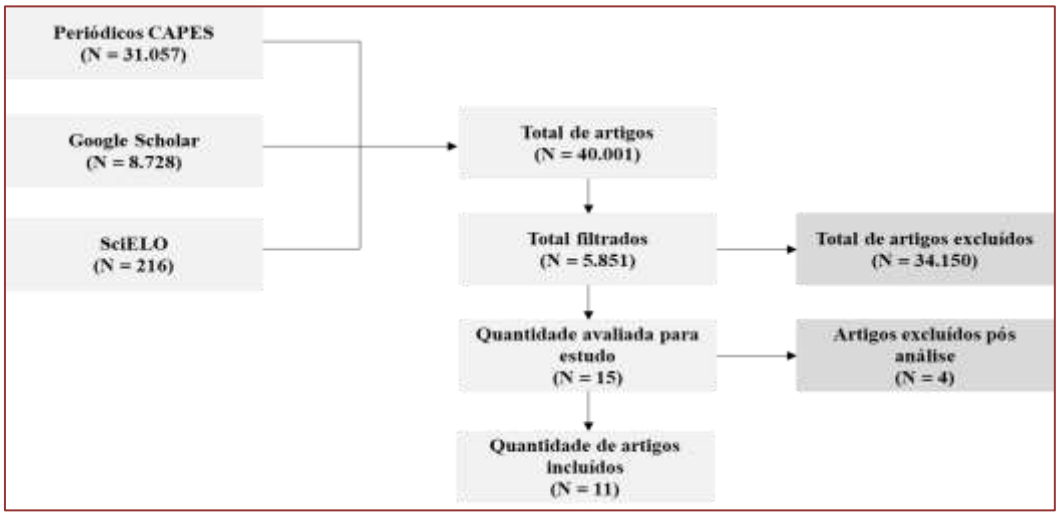
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. QUANTITATIVO DE PESQUISAS

Mediante a revisão bibliográfica realizada, e com a utilização dos filtros metodológicos aplicados e análise de relevância com o tema, obteve-se ao final um total de 11 artigos selecionados para estudo.

A seguir, a Figura 3 exibe o fluxograma que resume as etapas do método de busca, triagem e seleção dos materiais, enfatizando como a quantidade de publicações foi diminuindo gradualmente até a obtenção do volume final.

**Figura 3.** Fluxograma do método de seleção dos artigos




Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise quantitativa das publicações permitiu identificar o panorama geral das pesquisas relacionadas ao uso de aditivos e cargas reforçantes em elastômeros aplicados à indústria calçadista. Embora a busca inicial tenha retornado um número expressivo de trabalhos sobre elastômeros, a aplicação dos critérios de exclusão resultou na seleção de 11 artigos diretamente alinhados ao objetivo desta revisão.

Observou-se que grande parte das publicações excluídas estava direcionada à indústria automotiva, especialmente à produção de pneus, evidenciando que, apesar da vasta literatura sobre elastômeros, há uma limitação significativa de estudos voltados especificamente ao setor calçadista. Esse resultado destaca uma lacuna científica relevante, sobretudo considerando a importância econômica e industrial desse segmento.

A distribuição dos estudos selecionados indicou maior concentração de pesquisas envolvendo borracha natural, enquanto trabalhos com borracha estireno-butadieno apareceram em menor número. Tal comportamento sugere uma maior adequação da NR às exigências de conforto, flexibilidade e leveza demandadas em aplicações calçadistas.

## 4.2. ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS

Na Tabela 1 é possível visualizar uma síntese comparativa dos 11 artigos selecionados, exibindo apenas os materiais estudados, aditivos ou modificadores utilizados, as propriedades físico-mecânicas avaliadas e os principais resultados. Essa tabela busca fornecer uma visão geral possibilitando discutir de maneira mais clara as metodologias ao longo do texto.

**Tabela 1.** Comparação qualitativa dos artigos em relação as propriedades físico-mecânicas por tipo de reforço e aditivo.

| AUTORES | MATERIAL DE ESTUDO | ADITIVO OU MODIFICADOR | PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS | PRINCIPAIS RESULTADOS |
|---|---|---|---|---|
| ULFAH, I. M. et al. 2015 | NR | Carga Carbonácea (CC) e Sílica | Dureza, abrasão, tração | Proporção 40/20 apresentou melhor desempenho |
| SREWARADACHPISAL, S. et al. 2020 | NR | CC, Argila Modificadora (AM), Plastificante/Extensor (PE), Agente de Vulcanização (AV) | Dureza, elasticidade, impacto | RSM previu quantidades ideais equilibrando dureza e impacto |
| LU et al. 2020 | NR | Antioxidantes fenólicos naturais | Tração, alongamento - após envelhecimento térmico -, estabilidade térmica | Antioxidantes aumentaram a resistência a oxidação e preservaram as propriedades |
| AHMED, J. K. 2015 | SBR | Nano sílica | Tração, dureza, abrasão, elasticidade | Pequenas doses melhoram as propriedades, grandes reduzem desempenho |
| BARU, F.; SAIWARI, S.; HAYEEMASAE, N. 2022 | Espumas de NR | Azodicarbonamida | Expansão, dureza | E-A 6-10 phr atenderam os requisitos da norma |
| ROSTAMI-TAPEH-ESMAEIL, E. et al. 2023 | Espumas de NR | Nanopartículas de Sílica reciclada e CC | Dureza, Compressão | Sílica reciclada garantiu desempenho e menor impacto ambiental |
| NAJIB, N. et al. 2009 | Espumas de NR | Bicarbonato de Sódio | Dureza, Expansão, Morfologia celular | Concentrações de AE alteraram estrutura e propriedade |
| ARGUELLO, J. M.; SANTOS, A. 2016 | Blenda de NR com BR, SBR e EPDM | Comparação entre elastômeros | Dureza, compressão | Aumento linear da borracha BR/SBR e polinomial em EPDM |
| BOUKFESSA, H.; BEZZAZI, B. 2021 | Blenda de NR com NBR | CC | Tração, dureza, abrasão | A adição de CC melhorou as propriedades |
| SERRANO-MARTÍNEZ, Víctor M. et al. 2024 | Mistura de SBR com poliuretano termoplástico (TPU) | Palha de arroz e celulose | Dureza, abrasão, tração, estabilidade térmica, alongamento na ruptura | Compostos naturais elevaram durabilidade e estabilidade em 10% de enchimento sem perda relevante de flexibilidade |
| XIAO, Q. et al. 2022 | Resíduo de borracha de calçados | Sem aditivo específico - foco em material reciclado - | Estabilidade térmica, análise das composições química dos resíduos, morfologia - sem foco nas propriedades físico-mecânicas | Método promoveu decomposição seletiva de resíduos com recuperação sustentável |

Fonte: Elaborada pela autora com base nos artigos selecionados (2025).

Esse compilado evidencia que, mesmo que diferentes elastômeros tenham sido abordados, a NR e SBR prevaleceram como ponto central dos estudos devido a sua versatilidade. Arguello e Santos (2016), por exemplo, retrataram que blendas entre NR e SBR possibilitaram ganhos em compressão e dureza evidenciando o impacto direto da formulação na performance físico-mecânica do elastômero. De maneira análoga, Boukfessa e Bezzazi (2021) mostraram que o aumento da CC em NR aperfeiçoou a resistência à tração e dureza, porém, com impacto na flexibilidade, o que demonstra a importância do equilíbrio entre conforto e rigidez. Em contraste, trabalhos como o de Baru *et al.* (2022), reforçaram a importância dos agentes esponjantes na NR, relacionando a concentração de AE à expansão e dureza do elastômero, retratando que essa variedade metodológica, para formação dos compósitos elastoméricos, exibe a abrangência de possibilidades para alcançar o desempenho almejado.

Por meio da análise geral dos artigos estudados, foi verificado que a NR é mais comumente relacionada a estudos que buscam harmonia entre dureza, tração e abrasão, principalmente quando reforçadas por CC e sílica, como apresentado por Ulfah *et al.* (2015).

Lu *et al.* (2020) enfatizou a influência de antioxidantes na preservação da durabilidade e estabilidade térmica, enquanto Srewaradachpisal et al. (2020) trouxeram a abordagem de metodologias estatísticas – método de superfície de resposta (RSM) – que permitiram prever de forma otimizada a elasticidade e impacto sobre o solado dos calçados. Enquanto isso, na SBR, notou-se a prevalência de investigações voltadas a dureza e abrasão, como apontado por Ahmed (2015), considerando seu uso em produções de maior desgaste.

A análise dos trabalhos selecionados indicou que a escolha da metodologia influencia de maneira direta nas propriedades centrais de cada estudo. Visto que, em NR a procura por equilíbrio entre resistência mecânica e processabilidade se destaca, o uso da SBR tem como objetivo central a otimização da dureza e abrasão, evidenciando que essa análise integrada não reforça somente a importância desses elastômeros no setor, como também o impacto das diferentes metodologias nos resultados finais.

## 4.3. PRINCIPAIS TIPOS DE ADITIVOS E CARGA REFORÇANTES

### 4.3.1. ELASTÔMEROS PREDOMINANTES NAS PESQUISAS

Os artigos analisados apontaram a borracha natural como o elastômero mais investigado, tanto em formulações convencionais quanto espumadas. A SBR apareceu de forma complementar, geralmente associada a melhorias específicas de resistência mecânica e abrasão. Essa predominância da NR está alinhada às exigências do setor calçadista, que prioriza conforto, flexibilidade e leveza.

### 4.3.2. AGENTES DE VULCANIZAÇÃO

Mediante análise dos materiais selecionados, verificou-se a predominância do enxofre como agente de vulcanização tradicional em formulações de NR e SBR para aplicação em calçados, citado de forma explícita nos artigos de Rostami et al. (2023) e Boukfessa e Bezzazi (2021). Os agentes de vulcanização, embora nem sempre detalhados de forma isolada nos estudos, são fundamentais para o desempenho final dos compostos. Sua atuação está diretamente relacionada à formação de ligações cruzadas, influenciando

propriedades como dureza, resistência mecânica e estabilidade térmica. A menor frequência explícita desse grupo nos artigos sugeriu que, muitas vezes, esses agentes são tratados como componentes implícitos das formulações.

### 4.3.3. ESPONJANTES

Os agentes esponjantes apareceram associados principalmente ao controle da expansão e da densidade dos compostos elastoméricos. Nos estudos analisados, sua aplicação esteve diretamente ligada à obtenção de materiais mais leves e com maior capacidade de amortecimento, características especialmente valorizadas em solados e palmilhas voltados ao conforto. Para esse aditivo, notou-se que o azodicarbonamida teve destaque no trabalho de Baru *et al.* (2022), enquanto o bicarbonato de sódio foi abordado no artigo de Najib *et al.* (2009).

### 4.3.4. ADITIVOS AUXILIARES

Os aditivos auxiliares, como aceleradores, ativadores e antioxidantes, surgiram de forma pontual nos artigos analisados, porém exercem papel essencial na processabilidade e na estabilidade dos elastômeros.

Nos materiais escolhidos foram identificadas as seguintes substâncias como aditivos auxiliares: óxido de zinco, ácido esteárico e antioxidantes, cada um citado de maneira explicita no artigo de Baru *et al.* (2022). Contudo, apesar de cada elemento ter sido apontado de maneira direta em apenas um artigo, isso não significa que tais aditivos tenham sido excluídos das formulações avaliadas, visto que, na prática, essas substâncias são integrantes fundamentais das misturas, omitidas muitas vezes da citação metodológica por não serem o foco central do estudo.Mesmo com menor destaque quantitativo, esses aditivos contribuem significativamente para a uniformidade da vulcanização e para a durabilidade dos compostos.

### 4.3.5. ÓLEOS EXTENSORES

O uso de óleos extensores está associado à redução da rigidez do material e ao ajuste da dureza, impactando diretamente o conforto do calçado, embora seu uso demande controle para evitar perdas excessivas de resistência mecânica. De acordo com os artigos estudados, verificou-se a utilização e citação explícita do óleo parafínico no trabalho de Boukfessa e Bezzazi (2021).

### 4.3.6. CARGA REFORÇANTE

As cargas reforçantes constituiram o grupo de maior destaque nos artigos analisados, com predominância da carga carbonácea e da sílica. Esses materiais são amplamente reconhecidos por melhorar propriedades como resistência à abrasão, tração e durabilidade, sendo considerados componentes centrais no desenvolvimento de compostos elastoméricos para aplicações sujeitas a desgaste.

### 4.4. EFEITO DA INTERAÇÃO CONJUNTA ENTRE CARGAS E ADITIVOS SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

A análise integrada dos artigos evidenciou que as propriedades físico-mecânicas dos elastômeros não dependem de um único componente da formulação, mas da interação entre elastômero base, cargas reforçantes e aditivos. Observou-se que ajustes na concentração de cargas e no sistema de vulcanização influenciaram diretamente propriedades como dureza, resistência à abrasão, tração, elasticidade e expansão.

Nos estudos com NR, destacou-se a busca por equilíbrio entre resistência mecânica e elasticidade, especialmente em formulações reforçadas com carga carbonácea ou sílica. Já nas formulações com SBR, o foco concentrou-se no aumento da durabilidade e da resistência ao desgaste. Além disso, agentes esponjantes mostraram impacto significativo na redução da densidade e no aumento do conforto, desde que empregados de forma controlada.

De modo geral, os resultados indicaram que a formulação adequada depende de uma abordagem integrada, considerando simultaneamente os efeitos individuais e combinados dos aditivos e das cargas, de forma a atender às exigências específicas da aplicação calçadista.

## 5. CONCLUSÃO

Através dessa revisão, foi possível compreender como os diversos tipos de cargas e aditivos impactam nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos de NR e SBR, elastômeros com bastante aplicação na indústria de calçados. Assim, notou-se que as cargas reforçantes foram os mais frequentes nos estudos devido a sua contribuição na otimização de propriedades como dureza, abrasão e aumento da resistência à tração. Contudo, os agentes de vulcanização, mesmo pouco citados nos artigos selecionados, são bastante frequentes na literatura, destacando a importância do processo de reticulação da borracha e no equilíbrio entre performance mecânica e estabilidade. Enquanto isso, os agentes esponjantes, aditivos auxiliares e óleos extensores obtiveram menor frequência, mas grande relevância, por deterem funções específicas como no controle da expansão, melhora da processabilidade, preservação contra oxidação e aumento da flexibilidade.

Além disso, foi possível apontar que as diferentes metodologias utilizadas pelos autores afetaram de maneira significativa os resultados, evidenciando a importância da padronização experimental. Dessa maneira, o estudo alcançou o seu objetivo de analisar e debater de maneira crítica os principais resultados acerca da utilização de cargas e aditivos em elastômeros, possibilitando melhorias futuras em formulações e estudos na área.

## REFERÊNCIAS

[1] ABICALÇADOS. **Indústria calçadista avança com materiais alternativos.** 19 ago. 2024. Disponível em: <Abicalçados - Indústria calçadista avança com a utilização de materiais alternativos>. Acesso em: 10 jul. 2025.

[2] AHMED, J. K. **Effect of nano silica on the mechanical properties of styrene-butadiene rubber (SBR) composite.** International journal of materials science and applications, v. 4, n. 2, p. 15, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Mohammed-H-Al-Maamori/publication/322153331_Effect_of_nano_silica_on_the_mechanical_properties_of_Styrene-butadiene_rubber_SBR_composite/links/5a48b245aca272d294609c67/Effect-of-nano-silica-on-the-

mechanical-properties-of-Styrene-butadiene-rubber-SBR-composite.pdf?origin=journalDetail&_tp=eyJwYWdlIjoiam91cm5hbERldGFpbCJ9>. Acesso em: 6 jul. 2025.

[3] ARGUELLO, J. M.; SANTOS, A. **Hardness and compression resistance of natural rubber and synthetic rubber mixtures.** Journal of physics. Conference series, v. 687, n. 1, p. 012088, 2016. Disponível em: <Hardness and compression resistance of natural rubber and synthetic rubber mixtures - IOPscience>. Acesso em: 6 jul. 2025.

[4] ASTM INTERNATION. ASTM D2240: **Standard test method for rubber property—durometer hardness**. 23 jul. 2021. Disponível em: < Método de teste padrão D2240 para propriedade de borracha - dureza do durômetro >. Acesso em: 12 ago. 2025.

[5] ASTM INTERNATION. ASTM D412: **Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers—tension**. 25 jun. 2021. Disponível em: < Métodos de Teste Padrão D412 para Borracha Vulcanizada e Elastômeros Termoplásticos - Tensão >. Acesso em: 12 ago. 2025

[6] BARU, F.; SAIWARI, S.; HAYEEMASAE, N. **Classification of natural rubber foam grades by optimising the azodicarbonamide content.** Polímeros, v. 32, n. 2, 2022. Disponível em: <SciELO Brasil - Classification of natural rubber foam grades by optimising the azodicarbonamide content Classification of natural rubber foam grades by optimising the azodicarbonamide content>. Acesso em: 8 jul. 2025.

[7] BOUKFESSA, H.; BEZZAZI, B. **The effect of carbon black on the curing and mechanical properties of natural rubber/ acrylonitrile- butadiene rubber composites.** Journal of applied research and technology, v. 19, n. 3, p. 194–201, 2021. Disponível em: <The effect of carbon black on the curing and mechanical properties of natural rubber/ acrylonitrile- butadiene rubber composites>. Acesso em: 8 jul. 2025.

[8] BU, Jianwen. **Rubber in shoes: role of technology and recycling based on a LCA analysis.** 2028. 2027. 77 f. Tese (Mestrado em Engenharia) – Politecnico di Milano, Milano, 2018. Disponível em: <Rubber in shoes : role of technology and recycling based on a LCA analysis>. Acesso em: 08 jul. 2025.

[9] CAMARGO, M. C. **Avaliação da dispersão de caulim em compostos de borracha natural: a influência da etapa de mistura**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 14 abr. 2025. Disponível em: <Avaliação da dispersão de caulim em compostos de borracha natural: a influência da...>. Acesso em: 17 ago. 2025.

[10] CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA. **Borracha de Estireno Butadieno (SBR)**. [s.d]. Disponível em: <Borracha de Estireno Butadieno (SBR) | Ciência e Tecnologia da BorrachaCiência e Tecnologia da Borracha>. Acesso em: 11 ago. 2025.

[11] DE QUÍMICA-IV REGIÃO, C. R. **A descoberta da borracha - CRQ**. [s.d]. Disponível em: <A descoberta da borracha - CRQ/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

[12] DELGADO, F. C. DA S. **Avaliação da influência de diferentes óleos extensores com baixo teor de policíclicos aromáticos nas propriedades da borracha à base butadieno e estireno (SBR).** 24 fev. 2011. Disponível em: <BDTD: Avaliação da influência de diferentes óleos extensores com baixo teor de policíclicos aromáticos nas propriedades da borracha à base butadieno e estireno (SBR)>. Acesso em: 16 ago. 2025.

[13] HIRANOBE, C. T. [UNESP]. **Avaliação da densidade de ligações cruzadas da borracha natural reticulada em diferentes sistemas de vulcanização por meio de ensaios mecânicos**. 31 jan. 2020. Disponível em: < Avaliação da densidade de ligações cruzadas da borracha natural reticulada em diferentes sistemas de vulcanização por meio de ensaios mecânicos >. Acesso em: 12 ago. 2025.

[14] LÓPEZ, Emil. **Rubber additives: compounding ingredients.** [livro eletrônico]. 2015. Disponível em: <(PDF) Rubber Additives -Compounding Ingredients>. Acesso em: 8 jul. 2025.

[15] LU, L. et al. **Insight into the anti-aging mechanisms of natural phenolic antioxidants in natural rubber composites using a screening strategy based on molecular simulation**. RSC Advances, v. 10, n. 36, p. 21318–21327, 2020. Disponível em: <Insight sobre os mecanismos antienvelhecimento de antioxidantes fenólicos naturais em compósitos de borracha natural usando uma estratégia de triagem baseada em simulação molecular ... - RSC Advances (RSC Publishing) DOI:10.1039/D0RA03425H>. Acesso em: 06 jul. 2025.

[16] NAJIB, N. et al. **Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam.** Journal of Physical Science, v. 20, n. 1, p. 13–25, 2009. Disponível

em: <Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam>. Acesso em: 8 jul. 2025.

[17] NEGRI, D. O. **Avaliação da influência da mistura de elastômeros nas propriedades físico-químicas e mecânicas de formulações elastoméricas**. 11 nov. 2023. Disponível em: < Avaliação da influência da mistura de elastômeros nas propriedades físico-químicas e mecânicas de formulações elastoméricas >. Acesso em: 12 ago. 2025.

[18] OSHIO, Raquel. **Polímeros: conceito, classificação, propriedades e reações químicas.** 29 jan. 2020. Disponível em: <Polímeros: conceito, classificação, propriedades e reações químicas>. Acesso em: 1 out. 2025.

[19] POLIURETANOS.NET. **Calçados.** [s.d]. Disponível em: <Capítulo 2>. Acesso em: 10 jul. 2025.

[20] ROSTAMI-TAPEH-ESMAEIL, E. et al. **Recycled silica as a renewable and sustainable alternative to carbon black in natural rubber foams.** Polymer international, v. 72, n. 12, p. 1104–1111, 2023. Disponível em: <Recycled silica as a renewable and sustainable alternative to carbon black in natural rubber foams - Rostami-Tapeh-Esmaeil - 2023 - Polymer International - Wiley Online Library>. Acesso em: 08 jul. 2025.

[21] ROTHER, E. T. **Revisão sistemática X revisão narrativa.** Acta Paulista de Enfermagem, v. 20, n. 2, p. v–vi, 2007. Disponível em: < SciELO Brasil - Revisão sistemática X revisão narrativa Revisão sistemática X revisão narrativa>. Acesso em: 10 jul. 2025.

[22] SERRANO-MARTÍNEZ, Víctor M. et al. **Exploring the mechanical and thermal impact of natural fillers on thermoplastic polyurethane and styrene-butadiene rubber footwear sole materials.** Polymers, v. 16, n. 22, p. 3201, 2024. Disponível em: <Exploring the Mechanical and Thermal Impact of Natural Fillers on Thermoplastic Polyurethane and Styrene–Butadiene Rubber Footwear Sole Materials - PMC>. Acesso em 8 jul. 2025

[23] SOUZA, S. G. DE et al. **Avaliação de diferentes formulações de compostos elastoméricos SBR/NR visando minimizar a pré-vulcanização**. Matéria (Rio de Janeiro**)**, v. 23, n. 4, p. e12258, 2018. Disponível em: <SciELO Brasil - Avaliação de diferentes formulações de compostos elastoméricos SBR/NR visando minimizar a pré-vulcanização Avaliação de diferentes formulações de compostos elastoméricos SBR/NR visando minimizar a pré-vulcanização>. Acesso em: 12 ago. 2025.

[24] SREWARADACHPISAL, S. et al. **Optimization of the rubber formulation for footwear applications from the response surface method.** Polymers, v. 12, n. 9, p. 2032, 2020. Disponível em: <Optimization of the Rubber Formulation for Footwear Applications from the Response Surface Method>. Acesso em: 8 jul. 2025.

[25] ULFAH, I. M. et al. **Influence of carbon black and silica filler on the rheological and mechanical properties of natural rubber compound.** Procedia chemistry, v. 16, p. 258–264, 2015. Disponível em: <Influence of Carbon Black and Silica Filler on the Rheological and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound - ScienceDirect>. Acesso em: 6 jul. 2025.

[26] VACCIOLI, K. B. **Efeito da adição de sílica, óxido de grafeno e agentes organossulfurados na vulcanização e nas propriedades de compostos baseados em borracha natural**. 2022. Disponível em: < KleberBitencourtVaccioliCorr22.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2025.

[27] XIAO, Q. et al. **Selective decomposition of waste rubber from the shoe industry by the combination of thermal process and mechanical grinding.** Polymers, v. 14, n. 5, p. 1057, 2022. Disponível em: <Selective Decomposition of Waste Rubber from the Shoe Industry by the Combination of Thermal Process and Mechanical Grinding>. Acesso em: 8 jul. 2025.

# Capítulo 3

## Análise do desempenho térmico de resíduos agrícolas na aplicação em isolamento térmico de edificações: uma revisão sistemática

*José Antônio Ferreira de Almeida Rêgo*
*Georgiana Maria Vasconcelos Martins*
*Rosinete Batista dos Santos Ribeiro*
*Josiane Dantas Costa*

Resumo: A construção civil é uma das grandes responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa e pelo consumo de aproximadamente 40% da eletricidade do planeta. A emissão desses gases acaba que por causar mudanças climáticas, levando ao aumento da temperatura mundial e consequentemente aumento do gasto energético com climatização de ambientes. Essas demandas podem ocasionar crises energéticas e impactos climáticos, o que evidenciam a urgência de repensar o planejamento das edificações. Tendo em vista essa necessidade, muitos países têm elaborado normas técnicas e recomendações relacionadas à eficiência energética nas construções, enfatizando a escolha de materiais apropriados. Este estudo surgiu a partir de uma abordagem metodológica baseada no método PRISMA, visando identificar materiais de isolamento térmico renováveis e menos poluentes que os convencionais encontrados no mercado. Os compósitos abordados provêm de resíduos agrícolas, os quais podem ser processados e empregados como componentes construtivos. Os resultados das pesquisas indicam que muitos desses materiais apresentam condutividade térmica (λ) abaixo do limite recomendado para isolantes (λ < 0,1 W/m.K). Dessa forma, materiais antes considerados resíduos emergem como alternativas construtivas viáveis. A escolha desse tema é motivada pela necessidade de desenvolver soluções inovadoras que possam contribuir para a redução do impacto ambiental associado à indústria da construção. Os resíduos agrícolas são abundantemente gerados em diversas regiões, representando uma fonte potencialmente valiosa de materiais para a construção. A utilização desses resíduos na forma de compósitos para revestir alvenarias oferece uma abordagem sustentável ao mesmo tempo em que pode melhorar o desempenho térmico dos elementos construtivos.

Palavras-chave: Desempenho térmico, Resíduos agrícolas, Isolamento térmico, Conforto térmico, Eficiência energética.

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente urbanização e constante crescimento populacional, a busca por moradia e alimentação torna-se cada vez mais essencial. Isso implica em uma maior demanda de materiais construtivos e também uma elevada produção agrícola, que acabam por gerar resíduos danosos ao meio ambiente.

A construção civil, além de ser uma das grandes responsáveis pela emissão de $CO_2$ na atmosfera, também consome grande parte dos recursos naturais não renováveis do planeta. Segundo dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2023), estima que a construção civil consome cerca de 28% da energia do mundo, sendo também responsáveis por cerca de 38% das emissões de dióxido de carbono.

Contudo, a busca por alternativas sustentáveis para as edificações, em termo de recursos naturais, leva à utilização de novas tecnologias que buscam a redução da produção de resíduos, com o uso de matérias naturais e reciclados, reduzindo o impacto ambiental e dando um novo destino final ao que a priori seria descartado (Cunha, 2012).

Assim sendo, surge a possibilidade da utilização desses materiais na produção de compostos, onde suas propriedades físico-químicas se complementam de forma a obter um material com maior eficiência do que se utilizasse de maneira isolada cada um deles. Com isso obtém-se materiais compósitos com excelentes propriedades, tais como: isolante térmico, ductibilidade, resistência a altas temperaturas, leveza e dureza (Macedo *et al*, 2011).

Com isso, percebe-se a importância de se ter consciência dos impactos negativos que a má gestão de resíduos pode acarretar ao meio ambiente e a sociedade, e que, se existe a possibilidade de utilização desses resíduos agrícolas como insumos para novas construções, é uma boa oportunidade de resolver dois problemas com apenas uma solução. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão sistemática aplicando o método prisma de pesquisas relacionadas ao desempenho térmico de resíduos agrícolas na aplicação em isolamento térmico de edificações.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. ISOLAMENTO TÉRMICO

Na construção civil, os isolantes térmicos desempenham um papel crucial na busca por eficiência energética e conforto térmico. Ao bloquear ou retardar os processos de condução, convecção e radiação de calor, os isolantes térmicos ajudam a manter a temperatura interna estável em uma edificação.

O isolante térmico para ser considerado bom, deve possuir baixo coeficiente de condutividade térmica, ter boa resistência mecânica, baixa difusividade térmica, ser de fácil aplicação e baixo custo (Cruz, Ferreira e Marinho, 2009).

As vantagens dos isolantes térmicos na construção civil são inúmeras e influenciam diretamente na qualidade das edificações e no bem-estar dos seus ocupantes. A redução do consumo de energia é uma das principais vantagens, pois os isolantes térmicos minimizam a necessidade de uso de sistemas de aquecimento ou refrigeração, resultando em economia de recursos e redução dos custos operacionais.

Em síntese, os isolantes térmicos representam uma solução eficaz e sustentável para a melhoria da eficiência energética e do conforto ambiental nas edificações.

## 2.2. CONDUTIVIDADE TÉRMICA ($\lambda$)

A condutividade térmica ($\lambda$), segundo a NBR 15220-1 (ABNT, 2005, p. 1) é a "Propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m$^2$, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro", e sua unidade de medida é W/(m.K).

## 2.3. RESÍDUOS AGRÍCOLAS

O Brasil é conhecido por seu grande potencial agroindustrial, principalmente por ser um país com grande produção agrícola. Como consequência disso, uma grande diversidade de resíduos como o bagaço de cana-de-açúcar, a fibra de coco e casca de arroz são produzidos diariamente.

O Brasil se destaca por ser o terceiro maior produtor de milho do mundo, alcançando uma produção de 109,42 milhões de toneladas do cereal (FAO, 2022). Considerando esse cenário, o desenvolvimento de pesquisas concentradas em estudar o potencial do uso desses rejeitos no campo da construção civil, tem crescido com o passar dos anos, visto que a tendencia da produção desses resíduos é aumentar.

## 2.4. DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

O desempenho térmico em edificações é importante para garantir o conforto dos ocupantes e otimizar o consumo de energia. O mesmo está relacionado à capacidade do edifício de manter uma temperatura interna adequada em diferentes condições climáticas, minimizando a necessidade de aquecimento ou refrigeração.

A seleção dos materiais de construção está intrinsecamente ligada à sua resistência mecânica, segurança e viabilidade econômica, muitas vezes relegando a consideração do desempenho térmico a um plano secundário. Um desafio significativo é aprimorar a eficiência energética dos edifícios, em consonância com a crescente consciência social sobre questões ambientais, a necessidade de reduzir resíduos e o esgotamento dos recursos não renováveis (MATI BAOUCHE, 2014).

Além disso, o conforto térmico é um aspecto fundamental para a qualidade de vida das pessoas que habitam ou trabalham em um edifício. Ambientes com temperaturas inadequadas podem causar desconforto, afetar a produtividade e até mesmo comprometer a saúde dos ocupantes. Portanto, projetar e construir edificações com bom desempenho térmico é essencial para proporcionar ambientes internos agradáveis e saudáveis.

## 2.5. NORMATIZAÇÃO

Para a normatização do desempenho térmico de materiais, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou a NBR 15220, que apresenta os índices a serem necessários para se calcular o Desempenho Térmico de Edificações. O índice fundamental, é a condutividade térmica ($\lambda$).

Além disso a importância do desempenho habitacional para a qualidade das edificações, elaborou-se a NBR 15575 (ABNT, 2013), que é um conjunto de normas que estipula o desempenho de acordo com requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação que proporcionam a construção de edificações mais seguras e eficientes.

Esta norma de desempenho complementa as normas pré-existentes, não substituindo-as, em que as normas de desempenho e prescritivas devendo ser utilizadas em conjunto. Asdrubali *et al.* (2015a) cita que "os sistemas e materiais de isolamento térmico visam reduzir a transmissão do fluxo de calor.

## 3. METODOLOGIA

Esse trabalho utilizará as diretrizes dos Itens de Relatório Preferidos para Revisões Sistemáticas e Meta-análises - PRISMA (PRISMA, 2018). A princípio será realizado um levantamento exploratório, com busca de dados a partir de artigos encontrados no Portal de Periódicos CAPES e Google Acadêmico, dos anos de 2018 até 2023.

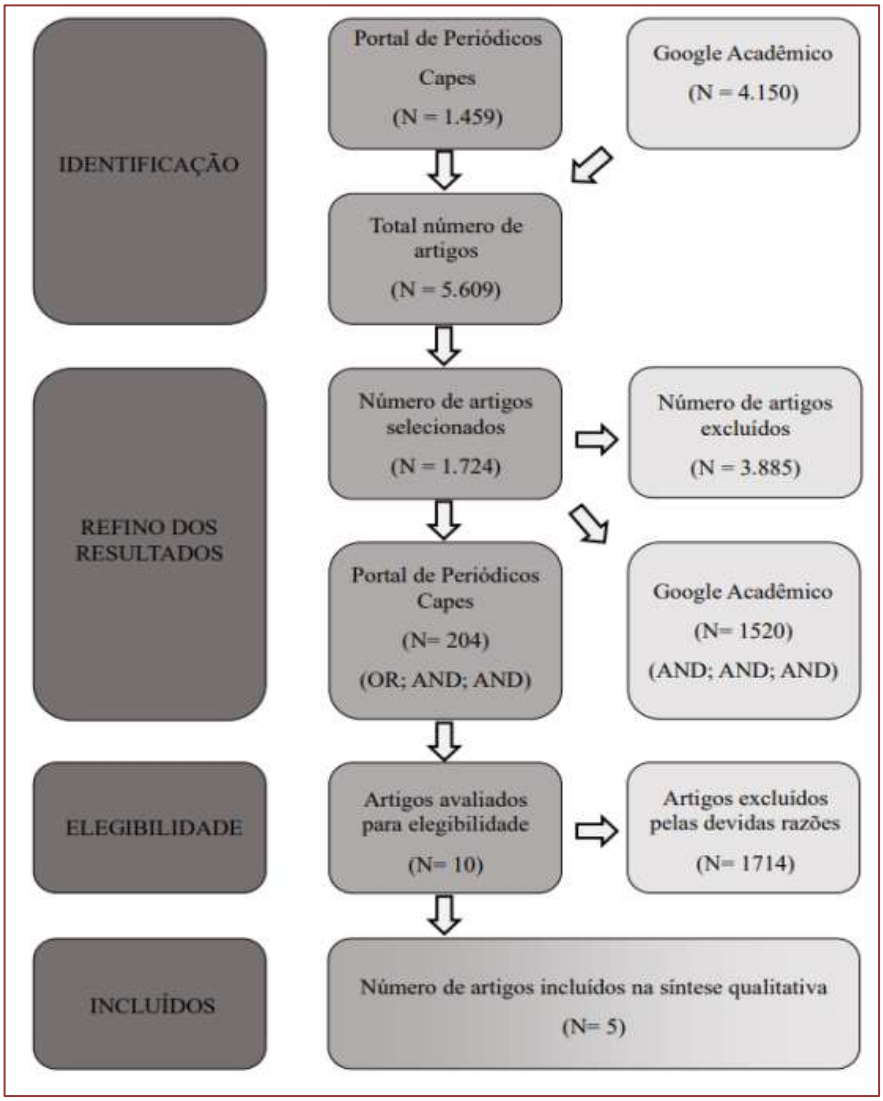
Para a pesquisa, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: "Desempenho Térmico", "Resíduos Agrícolas", "Isolante Térmico" e "Condutividade térmica", combinadas com os seguintes operadores booleanos "AND" e "OR". Para refinar os resultados, foram atribuídos filtros. Para o Google Acadêmico atribuiu-se os filtros: "Período específico" e "Ordenar por relevância". Já para o Portal de Periódicos Capes atribuiu-se os filtros: "Artigos"; "Acesso aberto"; "Periódicos revisados por pares" e "Anos: 2018 a 2023".

Foram incluídos artigos escritos no idioma português, publicados entre os anos de 2018 a 2023 que levassem em consideração o desempenho térmico de compósitos agrícolas, utilizados em revestimentos para alvenarias. Os artigos que não seguem essa temática, ou que não comprovassem, por meio de valores calculados, o desempenho térmico do compósito estudado, foram rejeitados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a estratégia de pesquisa da revisão sistemática PRISMA, foram identificados, inicialmente, 5.609 artigos, conforme a Figura 1. Entre esses, 1.459 artigos foram encontrados, utilizando-se o Portal de Periódicos Capes e 4.150 utilizando o Google Acadêmico. Dando sequência após a aplicação dos filtros, restaram 1.724 artigos selecionados, sendo 204 artigos do Portal de Periódicos Capes e 1.520 artigos do Google Acadêmico.

**Figura 1 -** Diagrama de fluxo de literatura utilizada




Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida foram lidos os títulos e resumos, de forma que apenas 10 foram considerados elegíveis para os critérios de pesquisa. Após uma análise minuciosa dos 10 artigos, 5 foram excluídos, restando apenas 5 que foram incluídos na síntese qualitativa, como se encontra apresentado na Figura 1.

Na Tabela 1 contém as informações resumida da revisão sistemática dos 5 artigos selecionados após a aplicação do método prisma. Nesta Tabela 1 reuniu-se as informações dos compósitos agrícolas, valor da condutividade térmica, parâmetros avaliados e todas as normas aplicadas nos estudos.

**Tabela 1 -** Informações dos compósitos agrícolas, valor da condutividade térmica, variáveis avaliadas no revestimento de paredes com compósitos agrícolas e as normas aplicadas

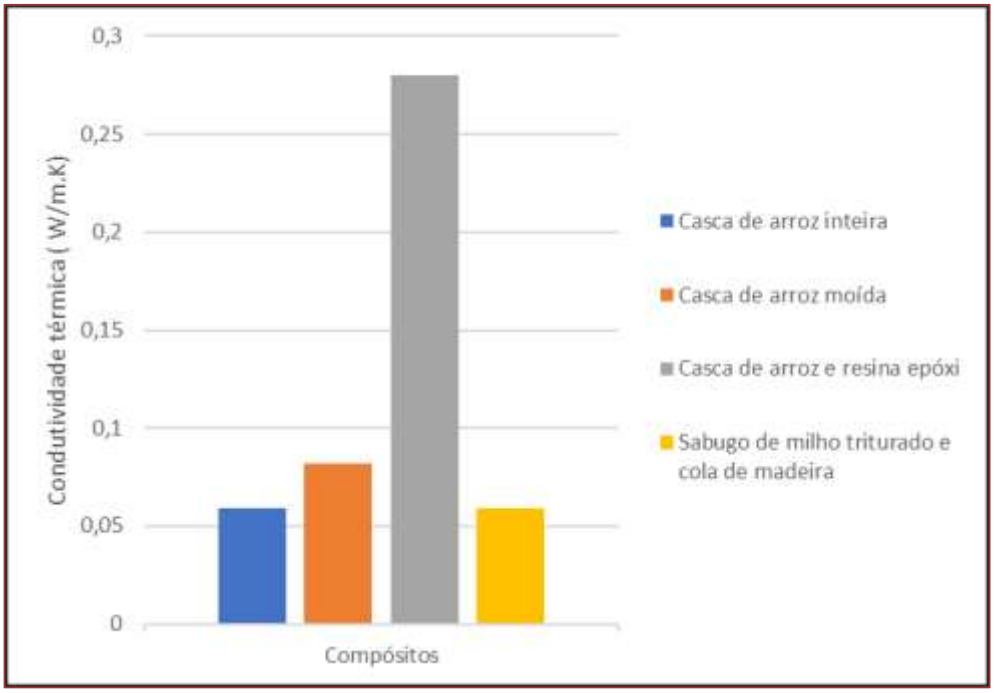
| Autores | Compósitos | Condutividade térmica (λ) W/m.K | Variáveis | Normas utilizadas |
|---|---|---|---|---|
| Rosa e Scherer (2018) | Casca de arroz inteira | 0,059 | Condutividade térmica (λ) | ABNT NBR 15220-1 :2005; ABNT NBR 15220-2 :2005; ABNT NBR 15220-3 :2005; ABNT NBR 15220-4 :2005; ABNT NBR 15220-5 :2005; |
| | | | Áreas das seções ($m^2$) | |
| | Casca de arroz moída | 0,082 | Resistência térmica de superfície á superfície para cada seção ($m^2$.K)/W | |
| | Casca de arroz e resina epóxi | 0,28 | Resistência superficial externa e interna ($m^2$.K)/W | |
| | Sabugo de milho triturado e cola de madeira | 0,059 | Resistência térmica da parede ($m^2$.K)/W | |
| | | | Resistência térmica total ($m^2$.K)/W | |
| Nejeliski, Duarte e Ferreira (2020) | Bagaço de cana | 0,068 | Tipo de compósito | ABNT NBR 15220 :2005; ISO 10534-2: 1996; NBR 5738: 2013; ASTM C518: 2015; NBR 13438: 2013; NBR 15270: 2005; NBR 6136: 2014; |
| | Casca de arroz | 0,07 | Densidade aparente (ρ) | |
| | Fibra de coco | 0,046 | Condutividade térmica (λ) | |
| | Palha | 0,053 | Espessura dos painéis (mm) | |
| | Sabugo de milho | 0,101 | | |
| Pachla, Silva, Jucá, Chong e Marangon (2019) | Matriz cimentícia leve | 0,242 | Tipo de compósito | NBR 15220: 2005; |
| | | | Condutividade térmica (λ) | |
| | | | Isolamento acustico (dB) | |
| | Composito de casca de arroz | 0,276 | Resistência à compressão axial (Mpa) | |
| Rosa, Grigoletti e Lima (2019) | Sabugo de milho moído e resina de mamona (AGT 1315) | 0,119 | Tipo de compósito | NBR 15220-3: 2005; NBR 11356: 2016; NBR 15575-4: 2013; NBR 16494; 2017; ASTM C518: 2017; |
| | | | Condutividade térmica (λ) | |
| | | | Densidade aparente (ρ) | |
| | | | Resistência a flexão (Mpa) | |
| Spinelli, Cambeiro e Konrad (2018) | Junco | 0,056 | Condutividade térmica (λ) | NBR ISO 14040: 2001; ABNT NBR 15220-1 :2005; ABNT NBR 15220-2 :2005; ABNT NBR 15220-4 :2005; NBR 15575: 2013; ISO 1182: 2010; |
| | Bagaço de cana | 0,046 | | |
| | Fibra de Folhas de Abacaxi | 0,043 | | |
| | Casca de Arroz | 0,057 | | |
| | Girassol | 0,073 | | |
| | Palha | 0,061 | Tipo de compósito | |
| | Fibra da Palma de Óleo | 0,055 | | |
| | Casca de Pinheiro | 0,069 | | |
| | Sabugo de Milho | 0,058 | | |
| | Fibra de Basalto | 0,032 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Rosa e Scherer (2018), analisaram a condutividade térmica e resistência térmica de quatro tipos de compósitos e sua aplicabilidade como isolantes térmicos em paredes de alvenaria de blocos de concreto e de blocos cerâmicos. Após análise, verificou-se que as paredes que possuem o compósito como uma camada intermediária entre o bloco e o reboco, possuem uma resistência térmica mais elevada devido os compósitos apresentarem uma baixa condutividade térmica, atendendo assim as exigências normativas.

Na Figura 2 observa-se os valores da condutividade térmica dos compósitos estudados por Rosa e Scherer (2018). O melhor compósito deste estudo foi "casca de arroz inteira", pois apresentou o menor valor de condutividade térmica (0,059 W/m.K), e o pior foi "casca de arroz e resina epóxi", pois além de apresentar maior custo, apresentou maior condutividade térmica (0,28 W/m.K).

**Figura 2 -** A condutividade térmica dos compósitos estudados por Rosa e Scherer (2018)

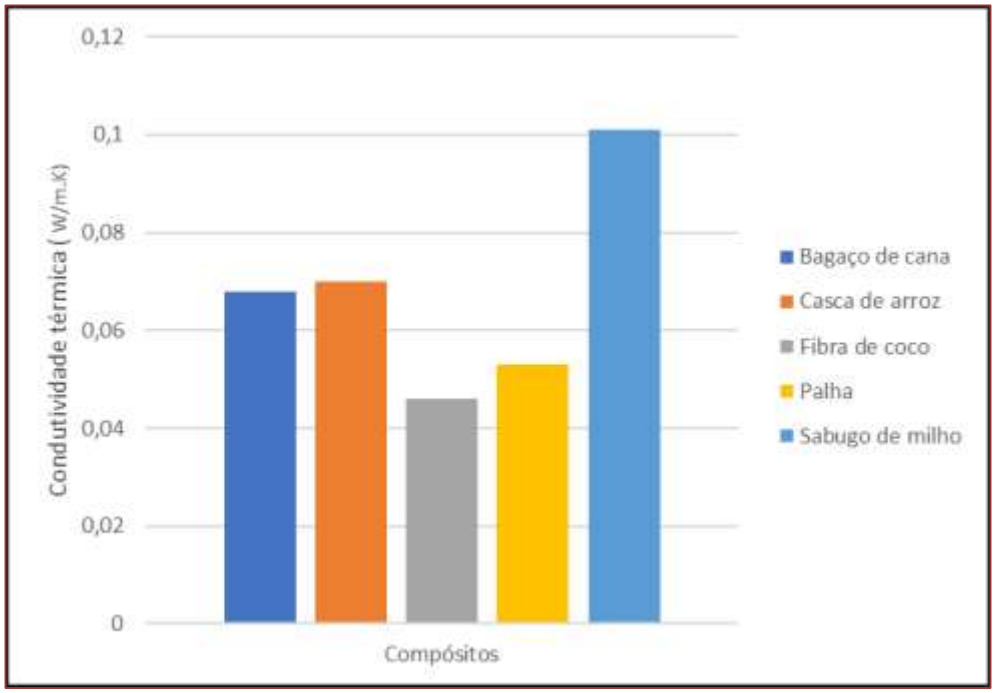



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nejeliski, Duarte e Ferreira (2020), analisaram a condutividade térmica de cinco resíduos agrícolas e suas aplicabilidades como isolantes térmicos alternativos aos convencionais disponíveis no mercado. A grande vantagem desses materiais naturais é o baixo custo, baixa densidade e baixa condutividade térmica.

Na Figura 3 contém os valores da condutividade térmica dos compósitos avaliados nos estudos de Nejeliski, Duarte e Ferreira (2020). Os compósitos avaliados neste estudo foram bagaço de cana, casca de arroz, fibra de coco, palha e sabugo de milho. O melhor compósito deste estudo foi “fibra de coco”, pois apresentou o menor valor de condutividade térmica (0,046 W/m.K), e o pior foi “sabugo de milho”, pois apresentou maior condutividade térmica (0,101 W/m.K).

**Figura 3 -** A condutividade térmica dos compósitos estudados por Nejeliski, Duarte e Ferreira (2020)

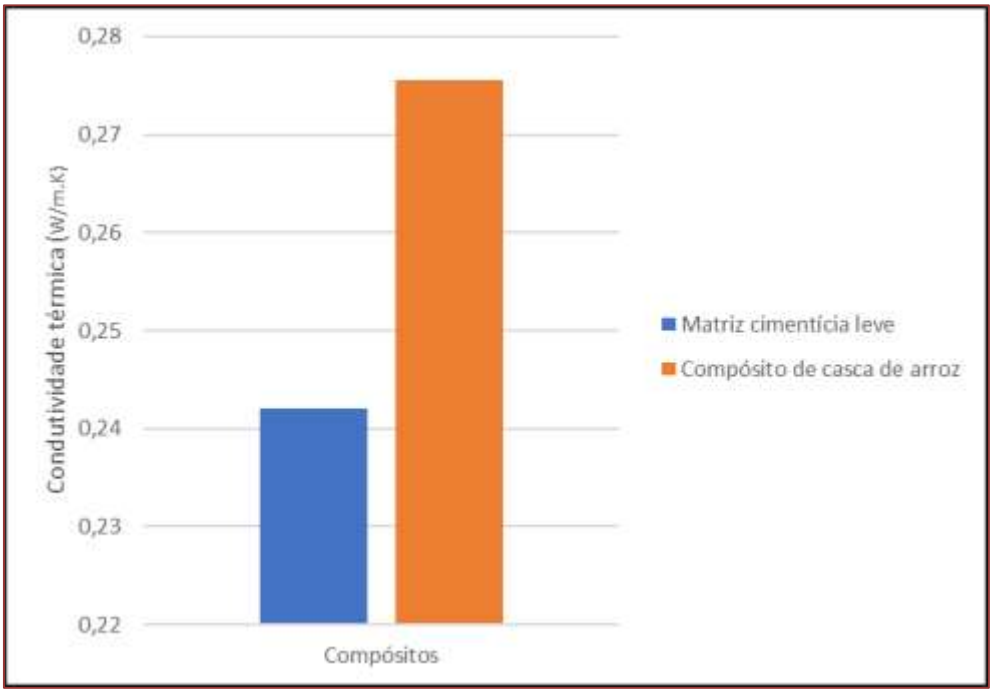



Fonte: Elaborado pelo autor

Pachla *et al.* (2019), realizaram um comparativo de uma matriz cimentícia leve e de um compósito de matriz cimentícia leve e casca de arroz, avaliando o uso como isolantes térmicos.

Na Figura 4 contém os valores obtidos para a condutividade térmica dos estudos de Pachla *et al.* (2019), os compósitos foram a matriz cimentícia leve e o compósito de casca de arroz. O melhor compósito deste estudo foi "matriz cimentícia leve", pois apresentou o menor valor de condutividade térmica (0,242 W/m.K), e o pior foi "compósito de casca de arroz", pois apresentou maior condutividade térmica (0,276 W/m.K). Entretanto, ambos os materiais não apresentaram valores adequados para serem considerados isolantes térmicos, visto que para isso o material deve apresentar valores inferiores a 0,1 W/m.K.

**Figura 4 -** A condutividade térmica dos compósitos estudados por Pachla et al (2019)

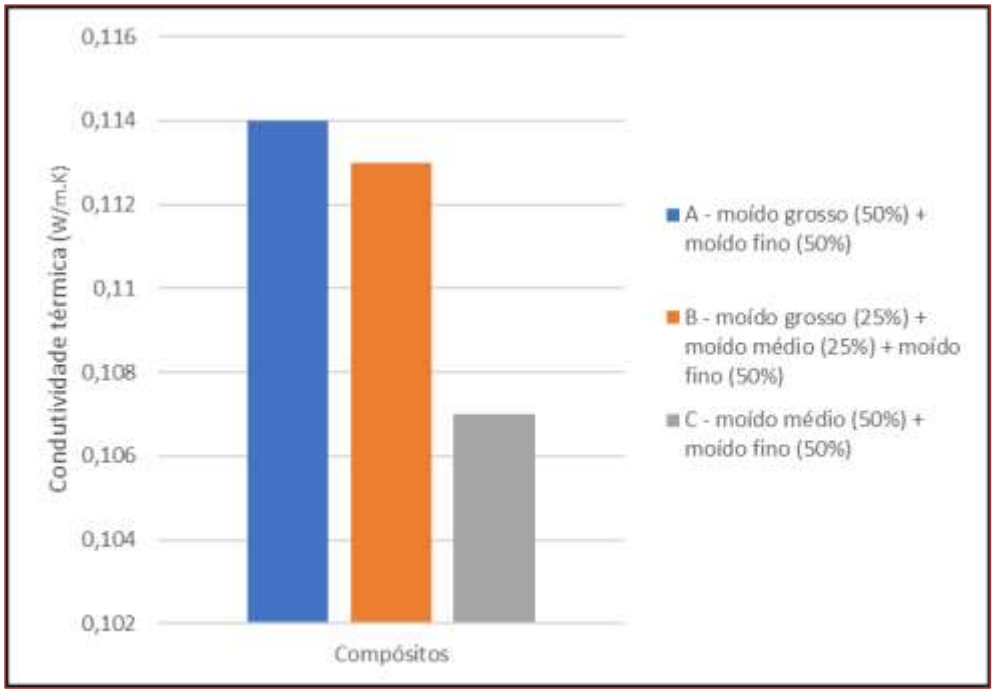



Fonte: Elaborado pelo autor.

Rosa, Grigoletti e Lima (2019), analisaram a condutividade térmica de três compósitos feitos de sabugo de milho moído e resina de mamona (AGT 1315) e suas aplicabilidades como isolantes térmicos.

Observa-se na Figura 5 a representação dos valores de condutividade térmica dos estudos de Rosa et al. (2019). Os compósitos avaliados foram o sabugo de milho moído em diferentes granulometrias adicionados do aglomerante de resina de mamona AG1315. O melhor compósito deste estudo foi o "C", pois apresentou o menor valor de condutividade térmica (0,107 W/m.K), e o pior foi o "A", pois apresentou maior condutividade térmica (0,114 W/m.K). Entretanto, ambos os materiais não apresentaram valores adequados para serem considerados isolantes térmicos, visto que para isso o material deve apresentar valores inferiores a 0,1 W/m.K.

**Figura 5 -** A condutividade térmica dos compósitos estudados por Rosa et al (2019)

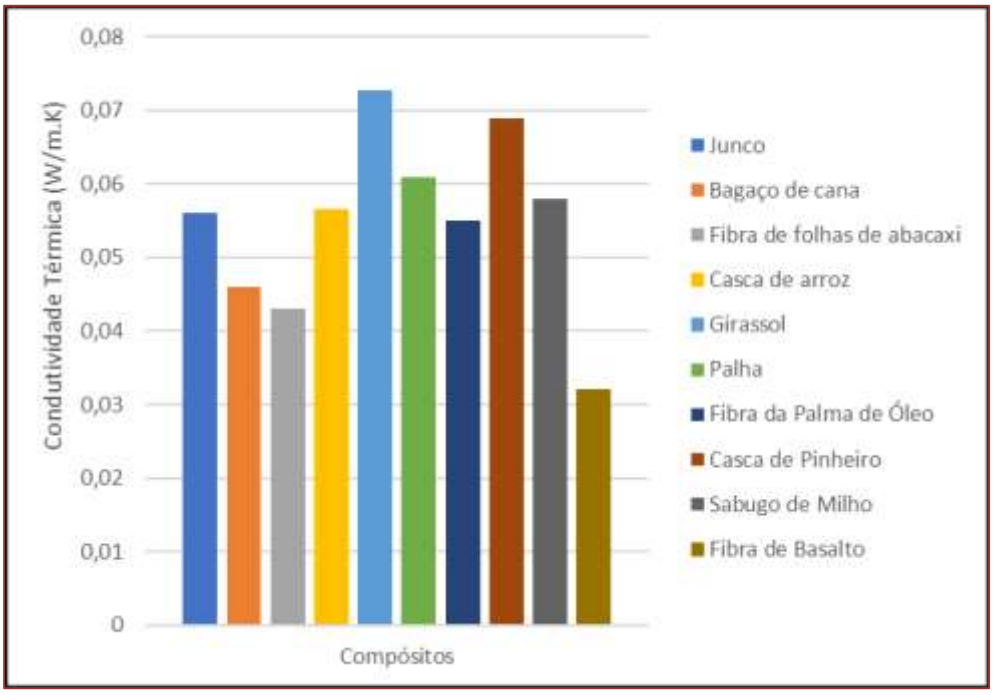



Fonte: Elaborado pelo autor.

Spinelli, Cambeiro e Konrad (2018), analisaram a condutividade térmica de uma dezena de materiais naturais e sua aplicabilidade como isolantes térmicos em edificações. No estudo verificou-se que para os materiais naturais analisados, todos apresentaram um índice de condutividade térmica ideal para serem utilizados como isolamento térmico.

Na Figura 6 observa-se a representação dos valores de condutividade térmica estudados por Spinelli *et al.* (2018). Os compósitos representados na Figura 6 foram junco, bagaço de cana, fibra de folha de abacaxi, casca de arroz, girassol, palha, fibra da palma de óleo, casca de pinheiro, sabugo de milho e fibra de basalto. O melhor compósito agrícola deste estudo foi “fibra de folha de abacaxi”, pois apresentou o menor valor de condutividade térmica (0,043 W/m.K), e o pior foi o “girassol”, pois apresentou maior condutividade térmica (0,073 W/m.K).

**Figura 6 -** A condutividade térmica dos compósitos estudados por Spinelli et al (2018)




Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. CONCLUSÃO

Diante da crescente preocupação com a sustentabilidade e a busca por alternativas ecologicamente corretas na construção civil, o uso de resíduos agrícolas como materiais para isolamento térmico em edificações emerge como uma solução promissora e viável. Os estudos apresentados demonstram que muitos desses resíduos possuem propriedades térmicas adequadas, com condutividade térmica abaixo do limite recomendado para isolantes, demonstrando um desempenho semelhante aos comerciais.

No entanto, é importante ressaltar que a viabilidade do uso de resíduos agrícolas como materiais para isolamento térmico depende de uma série de fatores, visto que os testes de condutividade térmica são realizados em laboratório, surgindo a importância de serem aplicados e analisados em modelos com escala real, para que seja feita uma comparação real com os materiais convencionais e assim, avaliar a sua durabilidade, resistência, e principalmente, estudar a vida útil desse material como isolante térmico.

Portanto, apesar do potencial promissor desses materiais, são necessárias pesquisas adicionais e investimentos em desenvolvimento tecnológico para otimizar os processos de produção, garantir a qualidade e durabilidade dos materiais, e avaliar sua performance em diferentes contextos climáticos e estruturais. Com esforços contínuos nesse sentido, o uso de resíduos agrícolas como isolantes térmicos pode se consolidar como uma alternativa sustentável e eficaz na construção civil do futuro.

## REFERÊNCIAS

[1] ABNT - Associação brasileira de Normas Técnicas. NBR 14724: Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação. 2011. 11 p. Disponível em:

http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2011/09/NBR_14724_atualizada_abr_2011.pdf . Acesso em: 25 nov. 2023.

[2] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-1 – Desempenho Térmico de Edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

[3] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-2 – Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

[4] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-4 – Desempenho Térmico de Edificações - Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro, 2005.

[5] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575 – Edifícios habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

[6] ASDRUBALI, Francesco; D'ALESSANDRO, Francesco; SCHIAVONI, Samuele. A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 04, p. 01 – 17, 2015.

[7] CRUZ, M. P.; FERREIRA, R. J. P.; MARINHO, G. S. Aplicação de resíduo industrial para isolamento térmico de ambientes. In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 24, 2009, Salvador. Anais... Salvador: ABEPRO, 2009. Disponível em:Acesso em: 07 dez. 2016.

[8] CUNHA, P. W. S. Estudo sobre as potencialidades de compósitos a base de gesso e fibra de coco seco para a aplicação na construção civil. 2012. 120p. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

[9] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. - Statistics – FAOSTAT. Food and agricultural commodities production. 2022. Disponível em: FAOSTAT. Acesso em: 25 de fevereiro de 2024.

[10] MACEDO, M. C.; Souza, l. G. M.; Gomes, I. R. B.; Medeiros, l. C. Materiais compósitos a base de gesso e isopor para a construção de casas populares. **Holos**. V.5. 2011. p. 95-105

[11] MATI-BAOUCHE, N.; DE BAYNAST, H.; LEBERT, A.; SUN, S.; LOPEZ-MINGO,C. J. S.; LECLAIRE, P.; MICHAUD, P. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. **Industrial Crops and Products**, v. 58, p. 244-250, 2014.

[12] NEJELISKI, Danieli Maehler; DUARTE, Lauren da Cunha; FERREIRA, Érika da Silva. USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS

[13] PACHLA, Eduardo et al. Desempenho térmico-acústico-mecânico de um compósito de matriz cimentícia leve reforçado com casca de arroz. **Revista Matéria**, Rio Grande do Sul, ed. 24, ano 2019, n. 2, 10 out. 2019.

[14] PRISMA - Principais itens para relatar revisões sistemáticas e meta-análises: a recomendação prisma. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, v. 24, n. 2, 2015. Disponível em: http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742015000200017 Acesso em: 25 nov. 2023.

[15] ROSA, Fábio Severo da; GRIGOLETTI, Giane de Campos; LIMA, Rogério Cattelan Antocheves de. Isolante térmico à base de sabugo de milho. In: ENSUS 2019, 7., 2019, Florianópolis.

[16] ROSA, Fábio Severo da; SCHERER, Minéia Johann. Desempenho térmico de paredes de alvenaria protegidas com revestimento de compósitos de resíduos agrícolas. **Revista Gestão Industrial**, Ponta grossa, ed. 2, ano 2018, n. 14, p. 96-113, 1 jun. 2018.

[17] SPINELLI, Rodrigo; CAMBEIRO, Faustino Patiã±O; KONRAD, Odorico. Estudo de materiais naturais para aplicação em isolamento térmico de edificações. Revista Ibero- Americana de Ciências Ambientais, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 121-135, 24 out. 2017. Companhia Brasileira de Produção Cientifica. http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2018.003.0011.

**[18]** UNEP. United Nation Environment Programme. Global status report for buildings and construction: towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. 2020. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR_ES.pdf Acesso em: 25 nov. 2023.

# Capítulo 4

## *A fitorremediação no tratamento de efluentes contaminados com metais pesados: uma revisão sistemática*

*Israele Mangueira Juca Gomes*
*Georgiana Maria Vasconcelos Martins*
*Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira*
*Thâmara Martins Ismael de Sousa*
*Jussara Silva Dantas*

Resumo: A contaminação de solos e efluentes por metais pesados, como Pb, Cd, Zn e Cu, representa um problema ambiental grave devido à sua toxicidade e persistência. A fitorremediação surge como uma alternativa sustentável e de baixo custo, capaz de remover ou estabilizar esses poluentes por meio de diferentes espécies vegetais. Este estudo, baseado no método PRISMA, analisou plantas herbáceas e florestais como aguapé, taboa, lentilha aquática, *Ricciocarpus natans*, vassourinha e bananinha para identificar sua eficiência no tratamento de áreas contaminadas. A técnica apresenta vantagens como simplicidade e benefícios ecológicos, mas também limitações, incluindo o tempo necessário para os resultados e o descarte adequado da biomassa contaminada. O trabalho reforça a importância da fitorremediação para a recuperação ambiental e sua relevância em países em desenvolvimento.

Palavras-chave: fitorremediação; metais pesados; recuperação ambiental; efluentes; sustentabilidade.

## 1. INTRODUÇÃO

Diante do crescimento da contaminação de solos e efluentes por metais pesados, resultante de atividades industriais, agrícolas e urbanas, representa uma ameaça significativa à saúde humana e aos ecossistemas. Nesse contexto, torna-se urgente investigar técnicas de remediação que sejam eficazes, sustentáveis e economicamente viáveis. A fitorremediação, por utilizar plantas na remoção ou estabilização de contaminantes, destaca-se como alternativa promissora, especialmente em países em desenvolvimento.

A seleção deste tema tem como base a crescente preocupação com os impactos ambientais e à saúde pública causados pela contaminação de solos e águas por substâncias tóxicas. A fitorremediação surge como uma alternativa sustentável, de baixo custo e com menor impacto ambiental. O tema é relevante por seu potencial de aplicação prática na recuperação de áreas degradadas, promovendo a preservação ambiental e a melhoria da qualidade de vida da população exposta à poluição.

A eficiência da fitorremediação demostrou um significado no tratamento de efluentes contaminados por metais pesados, especialmente em áreas afetadas por atividades industrias minerados e pelo descarte inadequado de resíduos. Mas também, diversos estudos demonstram a capacidade de absorve, acumular ou estabilizar metais pesados presentes nas águas, solo, tornar-se uma técnica de alternativas viável aos métodos convencionais que muitas vezes são caros, complexos e ambientalmente agressivos.

Dessa forma, com este trabalho de pesquisa, planeja-se contribuir para ampliação do conhecimento sobre a fitorremediação como alternativa eficiente e sustentável no tratamento de efluentes contaminados por metais pesados. Através de analises dodesempenho de espécies vegetais, é possível demonstrar que é possível aliar simplicidade, baixo custo e eficácia em uma técnica que pode ser aplicada em diferentes regiões com recursos limitados. Acredita-se que os resultados desse estudo sirvam como base para futuras pesquisas, e um desenvolvimento ambiental sustentável.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. CONCEITO DE FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação é uma técnica biotecnológica que faz uso de plantas para remover, degradar ou estabilizar substâncias tóxicas em ambientes contaminados, principalmente metais pesados. Essa prática tem ganhado espaço por ser uma alternativa sustentável, econômica e ecologicamente correta, especialmente em locais impactados por atividades industriais e agrícolas (Smits, 2005).

Essa estratégia pode acontecer de diferentes formas, como a fitoextração (acúmulo de contaminantes nas partes aéreas das plantas), fito estabilização (imobilização dos poluentes no solo), rizofiltração (remoção por meio das raízes), entre outras (Salt *et al.*, 1995).

## 2.2. CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS EM EFLUENTES

Metais como chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e zinco (Zn) estão entre os poluentes mais perigosos, devido à sua toxicidade e permanência no meio ambiente. Esses metais geralmente são resultado de processos industriais, mineração e uso de defensivos agrícolas (GHOSH; SINGH, 2005).

Quando descartados de forma inadequada, principalmente em corpos d'água, afetam a qualidade da água, prejudicam a fauna aquática e colocam em risco a saúde humana (Rezende *et al.*, 2014).

## 2.3. APLICAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO EM EFLUENTES CONTAMINADOS

Os estudos analisados nesta revisão mostraram que a fitorremediação tem sido uma técnica bastante explorada no tratamento de efluentes contaminados com metais pesados. Espécies como o aguapé (*Eichhornia crassipes*), a taboa (*Typha angustifolia*), a lentilhad'água (*Lemna minor*), *Spirodela polyrhiza* e *R. natans* foram citadas com frequência nos artigos analisados, apresentando bons resultados na absorção de metais como Cd e Pb.

O aguapé e a taboa, por exemplo, foram testados tanto em experimentos com biomassa seca (biossorção), quanto em cultivos vivos em soluções contaminadas, mostrando eficiência na remoção de cádmio e chumbo em diferentes tempos de contato.

Já *Spirodela polyrhiza e R. natans* foram cultivadas em condições controladas, com resultados promissores para uso futuro em ambientes aquáticos contaminados. Também foi verificado o uso da espécie *Brassica rapa L.* em estudos *in vitro*, para avaliar os efeitos do cádmio no crescimento vegetal e como a adição de substâncias como a prolina pode ajudar na tolerância da planta à contaminação.

## 2.4. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA TÉCNICA

Entre os principais pontos positivos da fitorremediação estão o custo acessível, a simplicidade de aplicação, a possibilidade de recuperação paisagística e a aceitação pública (Ali *et al.*, 2013). Por ser uma técnica baseada na natureza, ela é especialmente indicada para áreas onde o uso de tecnologias complexas seria inviável.

Contudo, essa técnica apresenta algumas limitações, como a necessidade de tempo prolongado para resultados efetivos, a dependência de fatores climáticos e ambientais, além da necessidade de descarte adequado da biomassa vegetal contaminada (Smits, 2005).

## 2.5. NORMATIZAÇÃO

No contexto ambiental brasileiro, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece diretrizes para o controle da poluição hídrica, inclusive quanto aos limites aceitáveis de metais pesados nos efluentes. A norma ABNT NBR 9898:1987 dispõe sobre a preservação e a amostragem de efluentes líquidos, estabelecendo procedimentos padronizados para coleta e transporte, essenciais para garantir a confiabilidade das análises químicas.

Além disso, a NBR 10004:2004 classifica os resíduos sólidos quanto à periculosidade, o que é fundamental nos estudos de fitorremediação, uma vez que muitos efluentes industriais se enquadram como resíduos perigosos devido à presença de metais como cádmio (Cd), chumbo (Pb), zinco (Zn), cobre (Cu), entre outros.

No que diz respeito à qualidade da água, a Resolução CONAMA nº 357/2005 define os padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e estabelece os limites máximos permitidos para diversos poluentes, incluindo metais pesados. Essa norma é amplamente utilizada como base para comparação dos resultados obtidos em estudos de fitorremediação, a fim de verificar a eficiência da técnica em atender aos padrões de qualidade ambiental exigidos pela legislação brasileira.

A Resolução CONAMA nº 420/2009, por sua vez, trata dos valores orientadores de qualidade do solo e das águas subterrâneas, sendo relevante em estudos que visam a remediação de áreas contaminadas. Assim, essas normativas, em conjunto, fornecem embasamento técnico e legal para a aplicação de técnicas de fitorremediação no Brasil, garantindo que os métodos propostos estejam alinhados com os critérios de segurança ambiental, saúde pública e sustentabilidade.

## 3. METODOLOGIA

Essa pesquisa foi conduzida tendo como base as diretrizes dos Itens de Relatório Preferidos para Revisões Sistemáticas e Meta-análises - PRISMA (Galvão, Tiguman, Sarkis, 2022). A princípio será realizado um levantamento exploratório, com busca de dados a partir de artigos encontrados no google acadêmico publicados nos anos de 2019 até 2023.

Para pesquisa, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “metais pesados”, “fitorremediação”, “remoção”, combinadas com o seguinte operador booleano “AND”. Para refinar os resultados, foram atribuídos filtros. Para o Google Acadêmico atribuiu-se os filtros: “Período específico” e “Ordenar por relevância” “Artigos”; “Acesso aberto”; “Periódicos revisados por pares” e “Anos: 2019 a 2023”.

Os criterios de seleção foram aplicados incluindo artigos escritos no idioma português, publicados entre os anos de 2019 a 2023, que abordassem especificamente a fitorremediação de solos e efluentes contaminados por metais pesados, com foco no uso de espécies vegetais. A seleção priorizou estudos que apresentassem dados quantitativos, discussões técnicas e análises comparativas sobre a eficiência de diferentes espécies vegetais, como o girassol, a mostarda indiana, o milheto e espécies florestais.

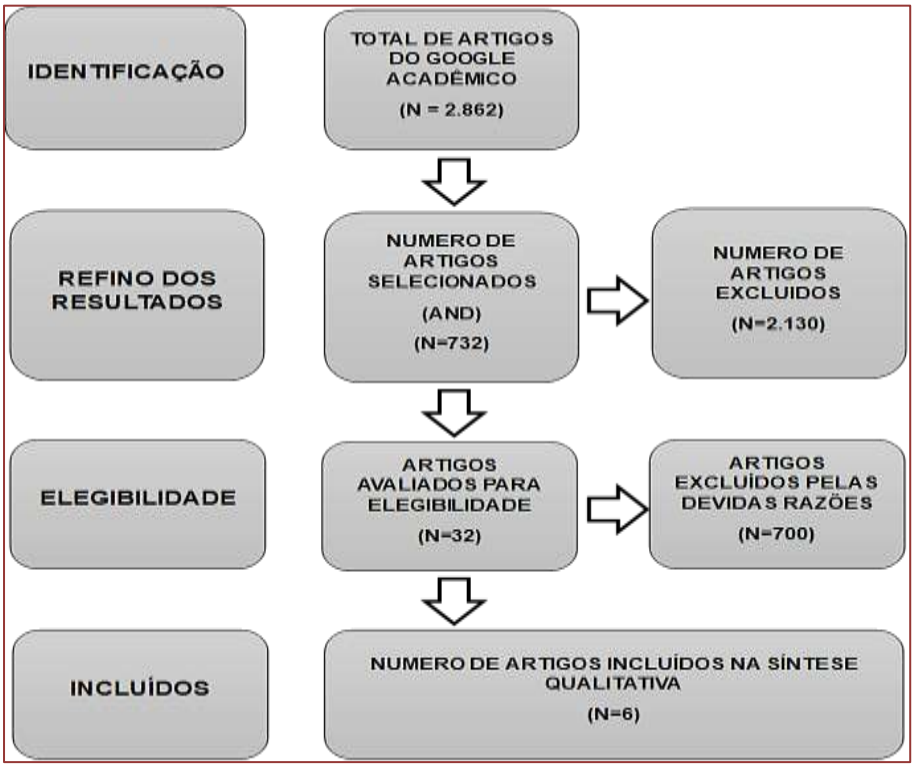
Quanto a análise dos estudos os aspectos analisados nos artigos selecionados, destacam-se a capacidade fitorremediadora das espécies utilizadas, o tempo de contato com os contaminantes e as técnicas aplicadas (biossorção e fitorremediação).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação da metodologia foi possível identificar, inicialmente, 2.862 artigos. Entre esses, 2.130 artigos foram encontrados, utilizando o Google Acadêmico. Após a aplicação dos filtros, 732 artigos foram selecionados. Após a leitura dos títulos e resumos, o que resultou na identificação de 32 artigos potencialmente relevantes, com base nos critérios de inclusão definidos para este estudo. Em seguida, procedeu-se à leitura integral e avaliação crítica do conteúdo desses artigos, a fim de verificar a aderência aos objetivos da pesquisa. Durante essa etapa, 26 artigos foram excluídos por diferentes razões, tais

como: duplicidade de publicações, ausência de foco específico na fitorremediação de metais pesados, abordagens metodológicas insuficientes para garantir a confiabilidade dos resultados e estudos direcionados a poluentes que não correspondiam ao escopo desta investigação. Assim, restaram 6 artigos, os quais atenderam integralmente aos critérios metodológicos e temáticos estabelecidos e foram, portanto, incluídos na etapa de síntese qualitativa, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1**-Diagrama de fluxo da literatura utilizada




Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Na Tabela 1 apresenta-se um compilado das informações mais relevantes extraídas desses trabalhos, evidenciando as espécies vegetais utilizadas em processos de fitorremediação, os contaminantes estudados em cada pesquisa e o potencial de cada espécie na absorção e remoção de metais pesados.

Os resultados dos estudos analisados indicam que diferentes plantas possuem capacidades variadas de absorção e remoção de elementos tóxicos, como Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cromo (Cr), Cobre (Cu) e Zinco (Zn). Dessa forma, destaca-se a importância da escolha adequada das espécies vegetais, de modo a maximizar a eficiência da fitorremediação em solos e águas contaminados.

**Tabela 1-** Espécies vegetais utilizada na fitorremediação de metais pesados, contaminantes estudados e potencial fitorremediador

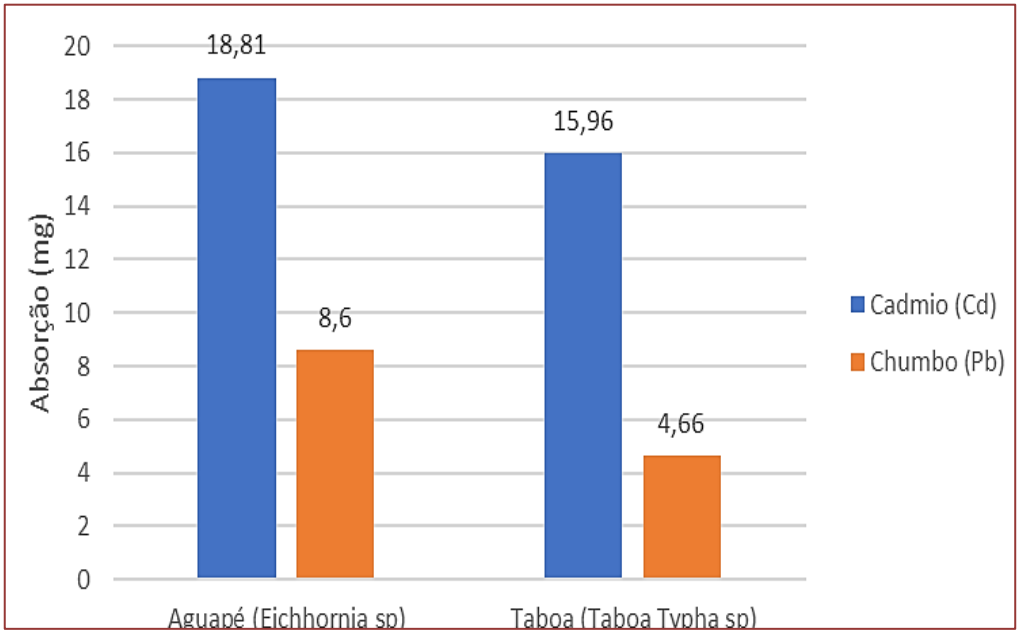
| Autor \ Ano | Espécie | Contaminante | Potencial Fitorremediador |
|---|---|---|---|
| Bartmeyer, Oliveira e coelho (2019) | (Eichhornia sp.) e a aguapé) (Taboa Typha sp.) | Biossorção de Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb) | Eichhonia.sp e a Toboa,Typha.sp apresentou na fitorremediação menor eficiência que a biossorção na remoção de metais pesados (Cd e Pb). |
| Silva, Lizieri e júnior (2021) | (Spirodela polyrhiza lentilha aquática) (Ricciocarpus natans planta flutuante aquática) | Ferro (Fe) e Manganês (Mn) | Spirodela. Plz Ricciocarpus natans, apresentou plantas que foram capazes de reduzir até 50% de para fitorremediação de (Fe). |
| Neto, Murro, Uliana e Antunes (2021) | (Milho, Zea mays) | Cádmio (Cd), Chumbo (Pb) e Cromo (Cr) | Apresentou alta capacidade de absorção de metais pesados (Cd, Pb, Zn, Cu), atuando como fitoextratora eficiente em solos contaminados. |
| Bruzzi, Neto, Franco, Camargo e Rosa (2019) | (Salvinia sp alface-d'água pequena.) | Chumbo (Pb) | Apresentam que as plantas que mais absorveram chumbo foram o Louro-pardo, MariA Mole, Ipê-roxo,Canafístula eJatobá, com maior acúmulo nas raizes. (Pb) |
| Oliveira e Moreira (2019 (2019) | (Eichornia crassipes aguapé) | Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Zinco(zn) | (Eichhornia crassipes) apresentou a capacidade de adsorver e remover os metais Pb, Cu e Zn em soluções contaminadas, sendo eficaz para fitorremediação. |

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Bartmeyer, Oliveira e coelho (2019), analisaram o potencial de biossorção e fitorremediação do cádmio (Cd) e chumbo (Pb) utilizando biomassa seca e plantas vivas de Aguapé (*Eichhornia sp.)* e Taboa (*Typha sp.*). O estudo foi realizado em duas etapas: inicialmente, avaliaram a biossorção dos metais utilizando a biomassa seca das plantas, seguida pela fitorremediação em soluções contaminadas com plantas vivas. Após a análise, observaram que a biossorção apresentou maior eficiência na remoção de Cd e Pb em comparação com a fitorremediação. As macrófitas utilizadas foram coletadas no Instituto de Botânica do Estado de São Paulo.

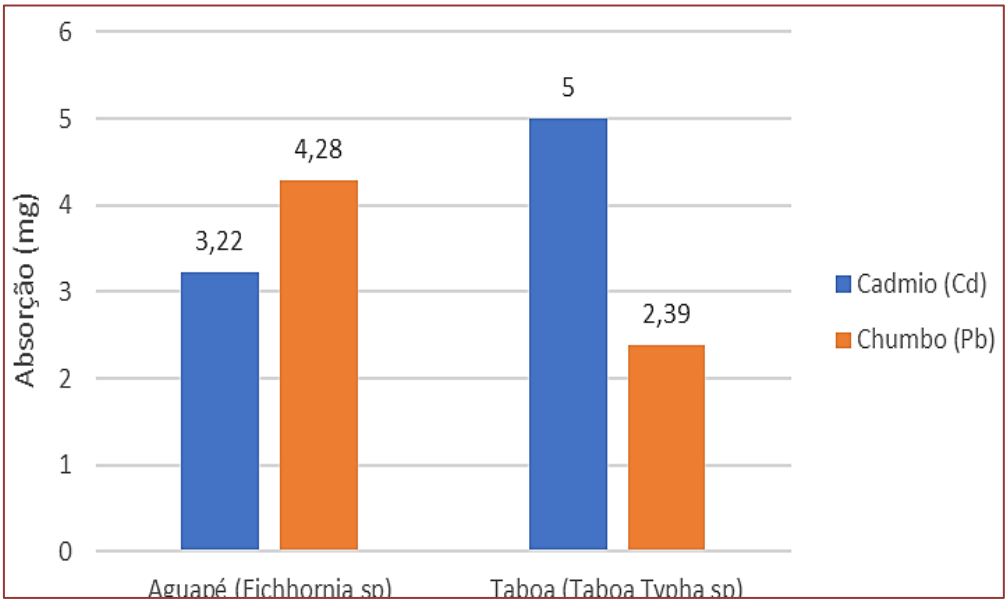
Os resultados de Bartmeyer, Oliveira e coelho (2019) estão expressos nas Figuras 2 e 3. Na Figura 2, observam-se os valores de biossorção de metais pesados por grama de biomassa seca de Aguapé (*Eichhornia sp.*) e Taboa (*Typha sp.*). Verificou-se que o Aguapé apresentou os melhores resultados, com maior capacidade de remoção tanto de Cádmio (18,81 mg/g) quanto de Chumbo (8,60 mg/g). A Taboa, apesar de também ter removido os metais, obteve valores inferiores. Já os resultados expressos na Figura 3 contém os resultados da fitorremediação com plantas vivas. Neste caso, a Taboa demonstrou maior eficiência na remoção de Cádmio (5 mg/g), enquanto o Aguapé obteve melhor desempenho na remoção de Chumbo (4,28 mg/g). De modo geral, a biossorção se mostrou mais eficiente que a fitorremediação na remoção de metais pesados.

**Figura 2-**Biossorção de Cádmio (Cd) e chumbo (Pb) por grama de biomassa seca de Aguapé e Taboa (2019)




Fonte: elaborada pelos próprios autores.

**Figura 3-**Fitorremediação de Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb) por grama de biomassa viva de Aguapé e taboa (2019)

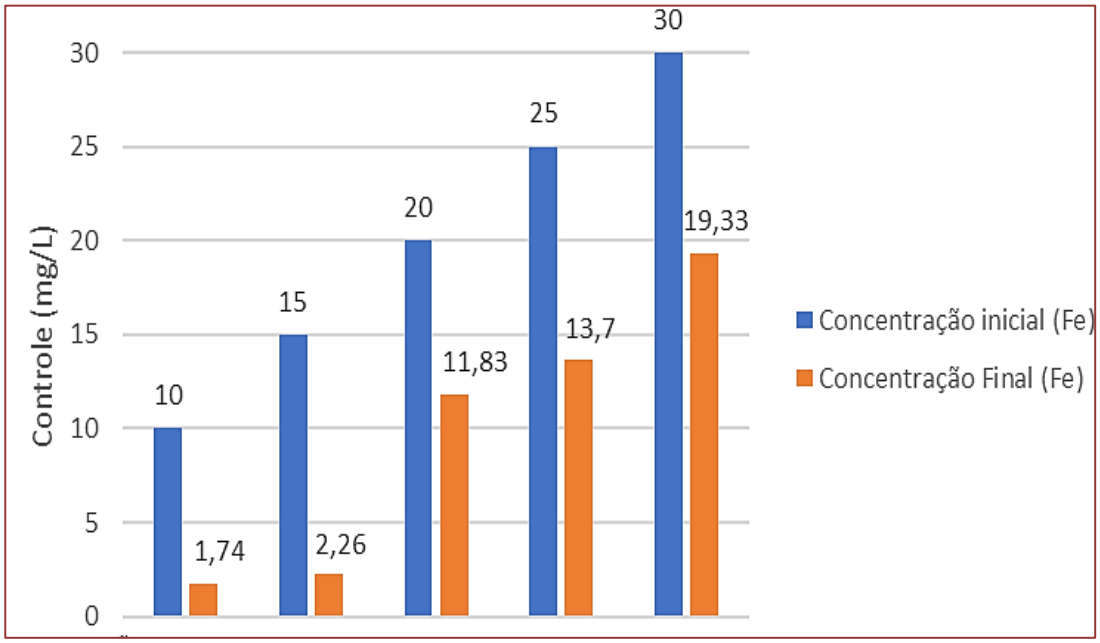



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Silva, Lizieri e júnior (2021) analisaram as espécies (*Spirodela polyrhiza*) lentilha aquática e (*Ricciocarpus natans*) planta flutuante aquática, cultivadas sob condições controladas com solução de Hoagland diluída durante 30 dias, com o objetivo de produzir biomassa para estudos de fitorremediação, avaliando a capacidade das plantas em reduzir a concentração de ferro (Fe) e manganês (Mn).

Na Figura 4 contém os resultados de Silva, Lizieri e Júnior (2021). A observação da Figura 4 contém a fitorremediação de Ferro (Fe) pela lentilha aquática (*Spirodela polyrhiza*). A planta apresentou redução significativa nas concentrações iniciais, especialmente nos valores mais baixos, alcançando reduções de até 84,91%. À medida que as concentrações de ferro aumentaram, a eficiência de remoção diminuiu, chegando a uma redução de 35,58% na maior concentração testada (30 mg/L).

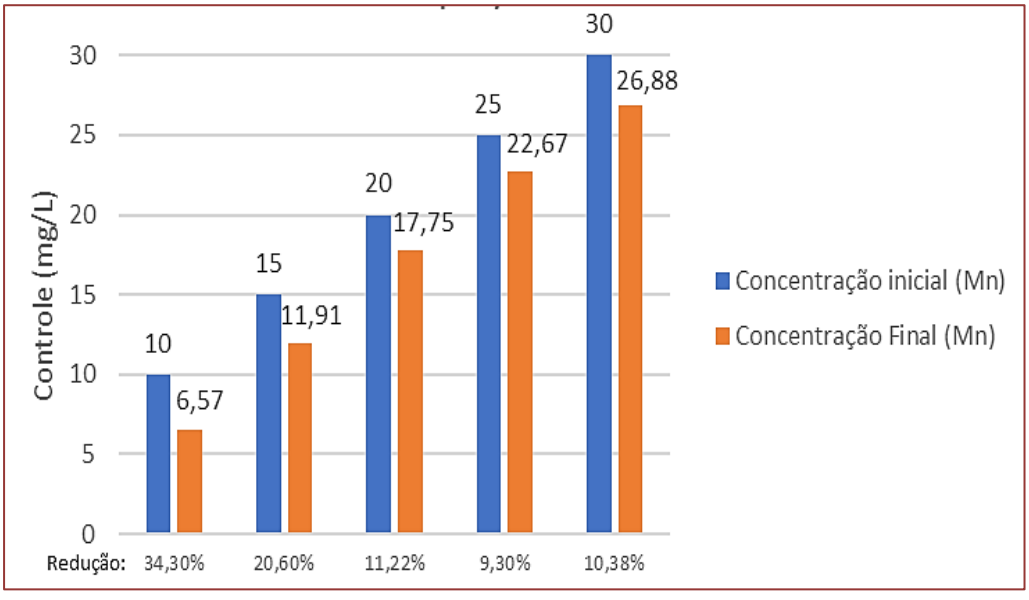
**Figura 4-**Fitorremediação de Ferro (Fe) por *Spirodela polyrhia* (2021)




Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Enquanto que na na Figura 5 contém a fitorremediação de Manganês (Mn) também pela (*Spirodela polyrhiza*) planta flutuante aquática. Os resultados indicam uma menor eficiência na remoção do Mn em comparação ao Fe, com reduções variando entre 34,30% e 9,30%. Mesmo assim, a planta foi capaz de reduzir as concentrações em todos os testes, confirmando sua capacidade de absorção.

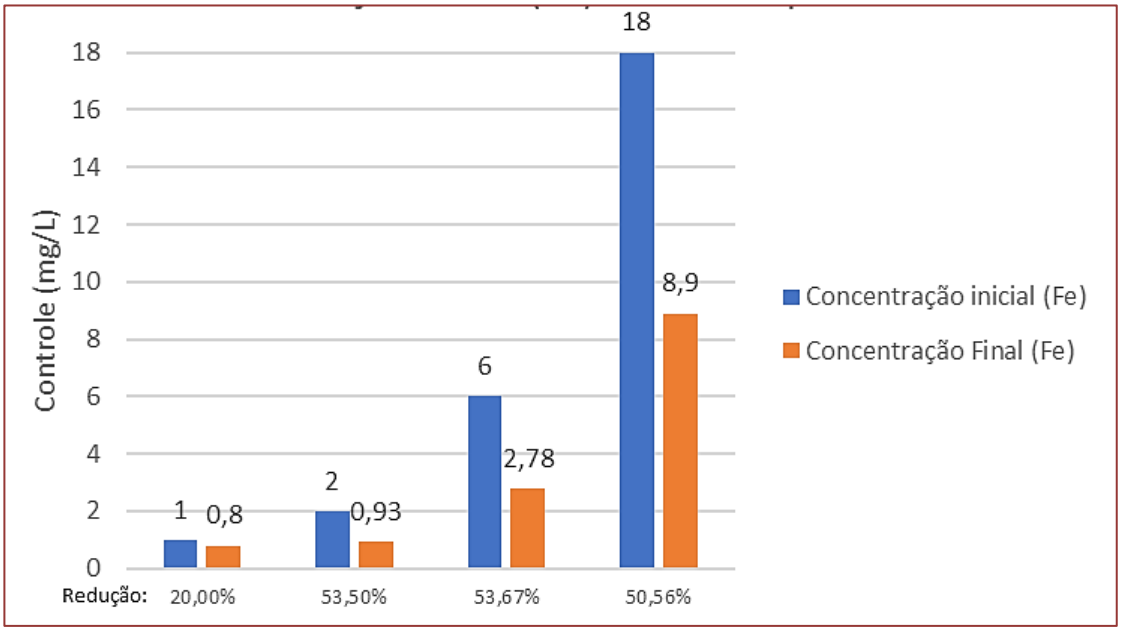
**Figura 5-**Remoção de manganês (Mn) por *spirodela polyrhiza* (2021)




Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Já na Figura 6, a espécie planta flutuante aquática (*Ricciocarpus natans*) demonstrou eficiência na fitorremediação do Ferro (Fe), com reduções que variaram entre 20,00% e 53,67%, dependendo da concentração inicial. Os melhores resultados foram observados nas concentrações intermediárias (2 mg/L e 6 mg/L), com mais de 50% de remoção do metal.

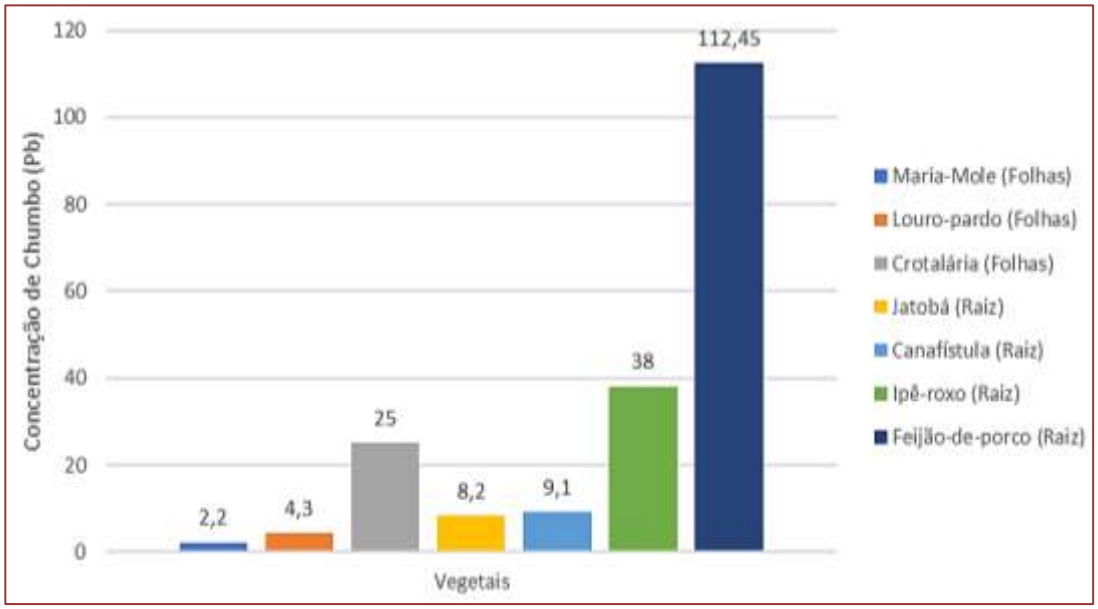
**Figura 6-**Remoçaõ de Ferro (Fe) por *Ricciocarpus natans* (2021)




Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Antunes *et al* (2021) investigaram o uso do milho como planta fitorremediadora em solos contaminados por metais pesados, analisando sua capacidade de fitoextração, acúmulo, hiperacúmulo e tolerância ao chumbo (Pb), cádmio (Cd) e cromo (Cr), considerando ainda os riscos ligados ao consumo humano e animal. Seus resultados estão contidos na Figura 7, observa-se que, à medida que a concentração de Cromo no solo aumentou, também houve um aumento significativo na concentração do metal nas folhas, caules e, principalmente, nas raízes da planta. As maiores concentrações de Cromo foram registradas nas raízes, atingindo 2801,52 mg/kg na dose mais alta (T4 – 1200 mg/kg), seguido pelos caules e folhas. Esses resultados indicam que o milho possui potencial para a fitorremediação, com destaque para o acúmulo nas raízes, característica típica de plantas hiperacumuladoras.

**Figura 7-**Concentração de cromo(cr) (2021)



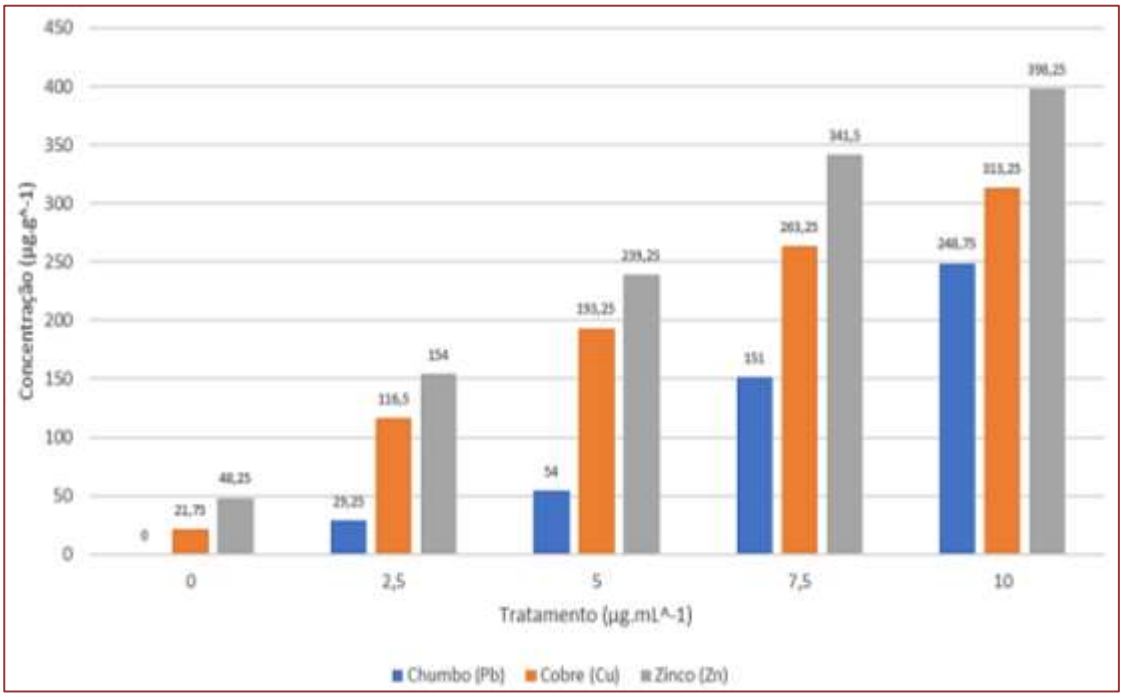

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Bruzzi *et al* (2019) avaliaram a capacidade fitorremediadora da macrófita aquática alface-d'água pequena (*Salvinia sp*) na remoção de chumbo (Pb) em meio aquoso, utilizando diferentes concentrações do metal (3,0; 6,0 e 9,0 $mg \cdot L^{-1}$) ao longo de 10 dias, com o objetivo de observar a resistência da planta e sua capacidade de bioacumulação. Seus resultados estão expressos na Figura 8 observa-se a fitorremediação de chumbo (Pb) por diferentes espécies vegetais. As espécies representadas foram Maria-Mole, Louro-pardo, Crotalária (Folhas), Jatobá, Canaístula, Ipê-roxo e Feijão-de-porco (Raiz). O vegetal que apresentou maior concentração de Pb foi o Feijão-de-porco (112,45 mg/kg), seguido pelo Ipê-roxo (38 mg/kg) e pela Crotalária (25 mg/kg). As espécies analisadas pelas raízes demonstraram maior acúmulo de chumbo em comparação às folhas.

Oliveira e Moreira (2019) estudaram a eficácia da biomassa seca de) aguapé (*Eichhornia crassipes* na remoção dos metais cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb) de soluções aquosas, por meio do processo de adsorção, evidenciando a eficiência da espécie como alternativa viável para o tratamento de corpos hídricos contaminados. Seus resultados estão contidos na Figura 9. Nesta Figura observou-se a concentração média dos metais pesados chumbo (Pb), cobre (Cu) e zinco (Zn) acumulados na biomassa seca do aguapé (*Eichhornia crassipes*) aguapé em diferentes tratamentos. Os valores aumentaram proporcionalmente com o incremento das concentrações dos metais no meio.O zinco (Zn) apresentou os maiores valores de concentração em todos os tratamentos, alcançando 398,25 $\mu g.g^{-1}$ no tratamento com 10 $\mu g.mL^{-1}$, seguido pelo cobre (Cu) com 313,25 $\mu g.g^{-1}$ e pelo chumbo (Pb) com 248,75 $\mu g.g^{-1}$ no mesmo tratamento. Já nas menores concentrações (2,5 $\mu g.mL^{-1}$), os valores foram mais baixos, sendo 29,25 $\mu g.g^{-1}$ para Pb, 116,5 $\mu g.g^{-1}$ para Cu e 154 $\mu g.g^{-1}$ para Zn.

De forma geral, o aguapé demonstrou capacidade de absorver todos os metais testados, com maior afinidade para zinco e cobre em comparação ao chumbo, indicando seu potencial para fitorremediação de ambientes contaminados por múltiplos metais pesados.

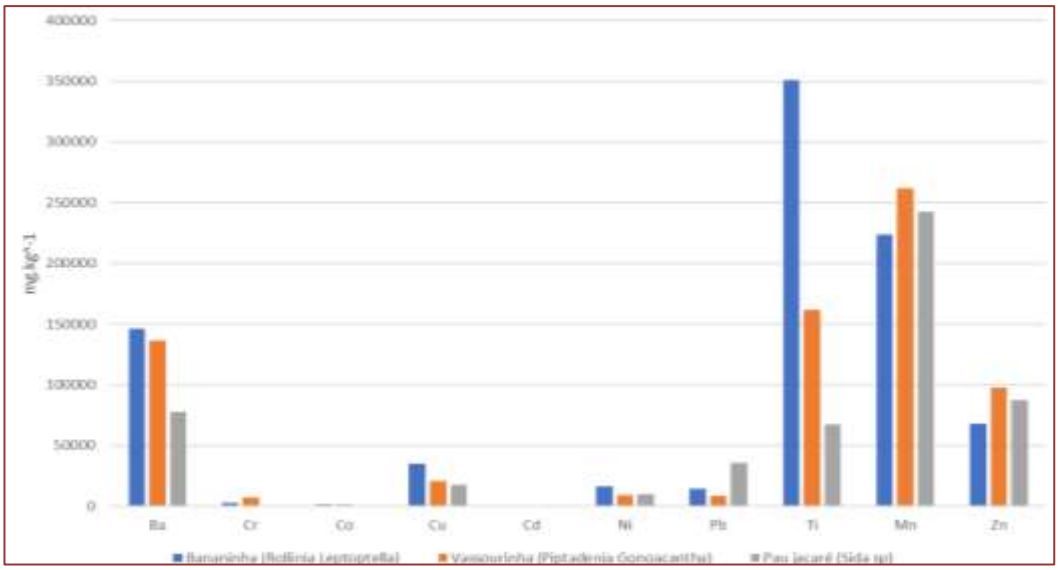
**Figura 9-** Concentração média de chumbo (Pb), cobre (Cu), e Zinco (Zn) (2019)




Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Horn *et al.* (2020) analisaram a fitorremediação de solos contaminados com metais pesados, com foco na atuação dos fitólitos, utilizando três espécies nativas do Cerrado: biribá-do brejo (*Rollinia leptopetala*), pau-jacaré(*Piptadenia gonoacantha*) e guanxuma(*sida sp*). Os resultados mostraram o potencial dessas espécies na redução da concentração e da disponibilidade de metais pesados no solo, indicando a viabilidade do uso dessas plantas em estratégias de recuperação Ambiental. Na Figura 10 observa-se as concentrações médias de metais pesados acumulados nas biomassas das espécies: iribá-do brejo (*Rollinia leptopetalla*), a pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*) e guanxuma (*Sida sp.*). De modo geral, percebe-se que as três espécies apresentaram diferentes capacidades de absorção dos metais analisados. A espécie Bananinha destacou-se por apresentar os maiores acúmulos de bário (Ba), cobre (Cu), titânio (Ti) e manganês (Mn), sendo o titânio o metal com maior concentração, atingindo aproximadamente 350.000 $mg.kg^{-1}$. A Vassourinha apresentou destaque principalmente para o acúmulo de manganês (Mn), com valor superior a 260.000 $mg.kg^{-1}$. Já o Pau-jacaré obteve os maiores valores para chumbo (Pb) e apresentou concentrações expressivas de zinco (Zn) e manganês (Mn).

**Figura 10-** Concentração médias de metais pesados nas biomassas de bananinhas, vassourinha e paujacaré com valores de Ti, MN e Ba (2020)




Fonte: elaborada pelos próprios autores.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados e análises apresentados ao longo desta pesquisa evidenciam que a fitorremediação se apresenta como uma técnica promissora, sustentável e economicamente viável para a recuperação de solos e efluentes contaminados por metais pesados. A revisão sistemática da literatura possibilitou reunir diferentes abordagens sobre a temática, identificando os principais metais poluentes, como chumbo (Pb), cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn), bem como seus impactos ambientais.

A análise dos trabalhos permitiu identificar as espécies vegetais mais utilizadas na fitorremediação, destacando-se o aguapé (*Eichhornia crassipes*), macrófitas aquáticas e espécies nativas, como a Bananinha, a Vassourinha e o Pau-jacaré. Os resultados dos estudos demonstraram que essas plantas possuem capacidades distintas de absorção, acumulação e imobilização de metais, sendo que algumas apresentam maior afinidade por elementos específicos, como o acúmulo de titânio (Ti) e manganês (Mn) pela Bananinha, ou a elevada retenção de chumbo (Pb) pelo Pau-jacaré. Tais diferenças reforçam a importância da seleção criteriosa das espécies vegetais de acordo com o tipo e o nível de contaminação.

Além disso, a avaliação da eficiência de espécies herbáceas e florestais revelou resultados positivos na remoção de metais pesados em solos e efluentes, corroborando o potencial da fitorremediação como alternativa ecologicamente correta e socialmente aceita. Ressalta-se também a possibilidade de associar essa técnica a outras formas de tratamento, o que pode ampliar sua eficácia e permitir sua aplicação em locais onde métodos convencionais não são economicamente ou ambientalmente viáveis.

Por fim, ao oferecer a viabilidade de aplicação da fitorremediação em diferentes contextos ambientais, destacam-se seus benefícios como a simplicidade de implementação, o baixo custo e a utilização de espécies nativas, bem como algumas limitações relacionadas ao tempo de resposta e à necessidade de pesquisas contínuas

para aprimorar sua eficiência. Dessa forma, verifica-se que a fitorremediação não apenas contribui para a mitigação da contaminação por metais pesados, mas também para a conservação da biodiversidade e para a promoção de um modelo de desenvolvimento sustentável, reforçando a relevância de investimentos em estudos e práticas voltadas à ampliação de sua aplicabilidade em larga escala.

## REFERÊNCIAS


[1] ALI, Hazrat; KHAN, Ezzat; SAJAD, Muhammad Anwar. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91, n. 7, p. 869-881, 2013.

[2] ANTUNES, Patrícia Alexandra, et al. Extração de metais tóxicos em solos contaminados utilizando o milho como possível fitorremediador. **Colloquium Exactarum**. ISSN: 2178-8332. V. 13. No. 3. 2021.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004 –Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9898:1987 – Preservação e técnica de amostragem de efluentes líquidos. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

[5] BARTMEYER, B. C.; OLIVEIRA, L. H. S.; COELHO, L. H. G. Comparação da retenção de cádmio e chumbo nos tecidos vegetais das macrófitas aquáticas aguapé (*Eichhornia sp.*) e taboa (*Typha sp.*) por biossorção e fitorremediação. **Holos Environment**, v. 19, n. 1, p. 145-159, 2019.

[6] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 [internet]. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>.

[7] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

[8] BRUZZI, S. C. F., NETO, J. C. L., FRANCO, E. S., Camargo, J. A., & Rosa, C. S. Potencial fitorremediador da Salvinia sp. na remoção de chumbo em efluente sintético. **Revista Vértices**. v 21, n3, 452-462, 2019.

[9] GALVÃO, T. F.; TIGUMAN, G. M. B.; ONOFRE, R.S. A declaração PRISMA 2020 em português: recomendações atualizada para o relato de revisões sistemáticas. **Epidemiologia e serviços de saúde**, v. 31, p. e2022364, 2022.

[10] GHOSH, Mridul; SINGH, S. P. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. **Asian Journal on Energy and Environment**, v. 6, n. 4, p. 18, 2005.

[11] HORN, H. M. F. et al. Si-fitólitos em Eudicotiledôneas e seu potencial na descontaminação de solos contendo metais pesados. **Geochimica Brasiliensis**. V.34, n 1; p.72 - 82, 2020.

[12] OLIVEIRA, L. H. S.; MOREIRA, R. F. Uso de biomassa seca de aguapé (*eichornia crassipes*) visando à remoção de metais pesados de soluções contaminadas. **Revista Hipótese**, Itapetininga, v. 5, n. 1, p. 200-214, 2019.

[13] REZENDE, H. C. et al. Avaliação da contaminação por metais pesados em corpos hídricos: uma revisão bibliográfica. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, Ariquemes, v. 5, n. 1, p. 15–27, 2014.

[14] SALT, David E. et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Bio/technology, v. 13, n. 5, p. 468-474, 1995.

[15] SILVA, D. M.; LIZIERI, C.; JÚNIOR, E. S. O. Plantas aquáticas em ecotecnologias: perspectivas para fitorremediação de ferro e manganês. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e29510313320-e29510313320, 2021.

**[16]** SMITS, P. E. Phytoremediation. **Annual Review of Plant Biology**., v. 56, n. 1, p. 15-39, 2005.

# Capítulo 5

## *Detecção das manifestações patológicas em alvenaria e estruturas de concreto por meio da análise de termografia infravermelha - uma revisão narrativa*

*Anderson Victor Cabral Dantas*
*Georgiana Maria Vasconcelos Martins*
*Shirley Waleska Cavalcante Araujo Silva*

Resumo: A termografia infravermelha é uma ferramenta de inspeção que não requer interrupções ou danos, permitindo criar imagens termográficas com base na emissividade dos materiais. O uso desse método na construção civil se mostra cada vez mais promissor, considerando sua eficácia na detecção de problemas patológicos. Neste trabalho, busca-se oferecer uma revisão narrativa que possibilite a identificação e análise das manifestações patológicas com corpos de prova feitos em laboratório, sistematizando os conceitos e resultados de cada estudo revisado. Além disso, serão analisadas as metodologias empregadas para aprimorar essas análises, bem como as influências e limitações que podem afetar a obtenção dos dados. Os dados obtidos revelam que o ensaio termográfico é amplamente aplicável na detecção de manifestações patológicas, além de permitir um diagnóstico precoce e monitoramento em tempo real, o que economiza tempo e dinheiro nessas operações. Através dos resultados analisados constatou-se que, a termografia infravermelha é de extrema relevância para o setor da engenharia civil, pois possibilita o diagnóstico das edificações e de suas patologias com precisão. Entretanto, para que sejam obtidos resultados satisfatórios, a análise deve ser meticulosamente precisa, apresentando umidade e temperatura reflexiva dentro dos parâmetros adequados.

Palavras-chave: termografia, infravermelha, patologias, ensaios, não destrutíveis.

## 1. INTRODUÇÃO

As edificações ao longo dos anos são solicitadas de diversas formas. A ABNT NBR 15575-2/ (2013) expressa que, durante a sua vida útil, diferentes condições afetam a sua durabilidade, como sobrecargas, vento, peso próprio, entre outros. Para preservar a integridade das edificações, devem ocorrer manutenções periódicas durante os anos, com isso, garante-se o funcionamento adequado e, consequentemente, um bom desempenho da estrutura (ABNT NBR 15575, 2021).

Na última década vale destacar a utilização da termografia infravermelha como uma técnica não destrutível e que podem ser útil para detectar patologias, como fissuras, umidade, descolamento de revestimento, dentre outros (Luz, Silveira e Soveiro, 2021). Na pesquisa de Borba Júnior *et al.* (2019) foi possivel verificar que os termogramas conseguiram detectar as anomalias no revestimento argamassado e que possivelmente não poderiam ser vistos a olho nu, assim pode-se afirmar que a técnica de termograifa infravermelho possibilita um diagnóstico preciso e preventivo. Nos estudos de Santos, rocha e Póvoas (2019) a termografia infravermelha demostrou ser uma tecnologia de grande utilidade na manutenção predial, porque conseguiram analisar as manifestações patológicas no deslocamento cerâmico da fachada predial existentes ainda na fase embrionária, reduzindo custos agravados na manutenção.

O uso da termografia na engenharia civil permite a detecção de anomalias de forma qualitativa e/ou quantitativa. Segundo a NBR 15424 (2016) que trata das terminologias do ensaio termográfico, conceitua dois tipos de termografia: Ativa e Passiva. A técnica de inspeção termográfica ativa requer estímulo térmico adicional (fontes externas), podendo ser óptico, sônico (ultrassom), indutivo, micro-ondas ou outra forma de energia. A técnica de inspeção termográfica passiva mede a radiação infravermelha emitida pelos objetos sem a necessidade de estímulos térmicos adicionais.

Pesquisas recentes foram capazes de utilizar a termografia para identificar anomalias em estruturas. Segundo Silva e Araújo (2022) analisaram os parâmetros termográficos da cerâmica nas inspeções para detecção de infiltrações. Na sua pesquisa foi desenvolvido um protótipo de parede de alvenaria com revestimento cerâmico, simulando uma infiltração em uma instalação hidráulica. Já nos estudos de Bauer, Lucenas e Pavon (2022) avaliaram a ocorrência de descolamento cerâmico em um edifício por meio de inspeção termográfica. Enquanto que Marques *et al.* (2024) utilizou a técnica de termografia para identificar pontos de corrosão em estágio inicial, em estrutura metálica elaborados em escala de laboratório.

Diante deste contexto, verifica-se que o uso da termografia infravermelha é de extrema aplicabilidade na área da construção civil. Desta forma, este estudo visa apresentar uma revisão narrativa de artigos científicos publicado em 2019 a 2024, no google acadêmico que, utilizaram a termografia de infravermelho para avaliarem as patologias em estruturas de alvenarias e concreto representadas em corpos de provas em escala de laboratório. Desta forma a presente pesquisa irá oferecer uma visão significativa da termografia como aliada para reduzir ou minimizar as manifestações patológicas na construção civil.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. PATOLOGIA NAS ESTRUTURAS

A palavra Phatos + logos significa estudo das doenças. Com isso, a semelhança entre o corpo humano e as construções e suas patologias são similares às manifestações patológicas. O quadro 1 compara algumas similaridades e diferenças entre o corpo humano e as edificações (Garcia e Albuquerque, 2025).

**Quadro 1:** Analogia entre o corpo humano e a edificação.

| Semelhanças | |
|---|---|
| Esqueleto | Estrutura |
| Circulação – sangue | Circulação de pessoas |
| Pele | Revestimento externo |
| Carne | Alvenaria |
| Membros/corpo/cabeça | Pilotis/corpo/coroamento |
| Pés | Fundação |
| Sistema nervoso | Sistema elétrico |
| Sistema urinário | Sistema hidráulico |
| Rins | Reúso de água |
| Visão/olhos | Aberturas/janelas |
| Sistema respiratório | Ar-condicionado/ventilação |
| Roupa/chapéu/bone | Brises/vedações |
| Orifícios | Aberturas |
| Saúde | Manutenção |
| Cérebro | Sala de controle predial |
| Cabelo | Telhado/cobertura |

Fonte: Adaptado de Garcia e Albuquerque (2025).

### 2.2. TIPOS DE PATOLOGIAS

Na literatura verifica-se as patologias nas seguintes estruturas: alvenaria de vedação, piso de concreto, concreto, aço, alvenaria estrutural, madeira, contenções e fundações. Como o foco da presente pesquisa é em patologias nas estruturas de alvenaria e concreto. Por esse motivo iremos destacar esses tipos de patologias citados.

Para Garcia e Albuquerque (2025), a falta de mão de obra especializada e a falta de um engenheiro civil podem trazer várias consequências para a vida útil da edificação. As fissuras, rachaduras e trincas são elementos que estão presentes em todas as etapas da obra, na execução da estrutura de concreto armado não seria diferente. De maneira geral, tais manifestações são simples de reconhecer, no entanto, as causas diferem, exigindo a consideração de cada contexto.

A alvenaria estrutural configura um sistema de construção em que as paredes compostas por blocos, sejam eles de concreto ou cerâmicos, sustentam todo o peso da edificação, dispensando a utilização de pilares e vigas tradicionais.

A durabilidade é essencial em estruturas de concreto armado, com isso, para que o processo de deterioração não ocorra, os cuidados com a execução da estrutura devem ser dobrados (Araújo, 2003).

As fissuras podem acometer a alvenaria de várias formas, seja por deformação térmica, movimentação da laje, fissuras horizontais e verticais. Para minimizar esses problemas, é necessário um profissional especializado e a obtenção de materiais de elevada qualidade (Garcia e Albuquerque, 2025).

Dito isso, a manutenção periódica é de fundamental importância na concepção para uma vida útil prolongada, assim como um projeto bem executado com o auxílio de materiais de alta qualidade.

## 2.3. TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Borba Júnior *et al.* (2019) citou em sua pesquisa que a termografia infravermelha é considerada uma técnica de ensaio não destrutível sendo amplamente aplicada no ramo da engenharia civil, permitindo uma análise das estruturas que compõe a construção civil ( estruturais, vedação, elétrico, entre outros).

Segundo Bauer, Lucenas e Pavon (2022) a termografia é classificada como ativa e passiva, estímulos naturais na emissão de radiação são a parte passiva da termografia, enquanto a energia projetada, seja de uma fonte de calor ou uma lâmpada, é considerada ativa.

Os termogramas podem ser analisados de forma qualitativa ou quantitativa. Nos estudos de Bauer, Lucenas e Pavon (2022), a análise é considerada qualitativa, quando as imagens são avaliadas apenas de forma visual, com identificação de pontos quentes e pontos frios nos termogramas. Enquanto que a análise quantitativa é aplicada quando, além de identificar e localizar uma anomalia, há o objetivo de classificar e avaliar o grau de dano. Na avaliação quantitativa são determinados os parâmetros termográficos (emissividade e temperatura aparente refletida) que conferem maior precisão aos dados de temperatura do objeto-alvo (Bauer, Lucenas e Pavon, 2022). Segundo Li (2016), a emissividade determina o calor emitido por um objeto, e está ligado diretamente a capacidade do material emitir energia por radiação em um determinado comprimento de onda.

Na pesquisa de Silva e Araújo (2022) a análise do comportamento térmico de corpos e objetos só foi possível graças à termografia infravermelha. Normalmente as cores branca, vermelha e amarela, demonstram níveis mais altos de temperatura, enquanto azul, violeta e preto temperaturas mais baixas.

## 3. METODOLOGIA

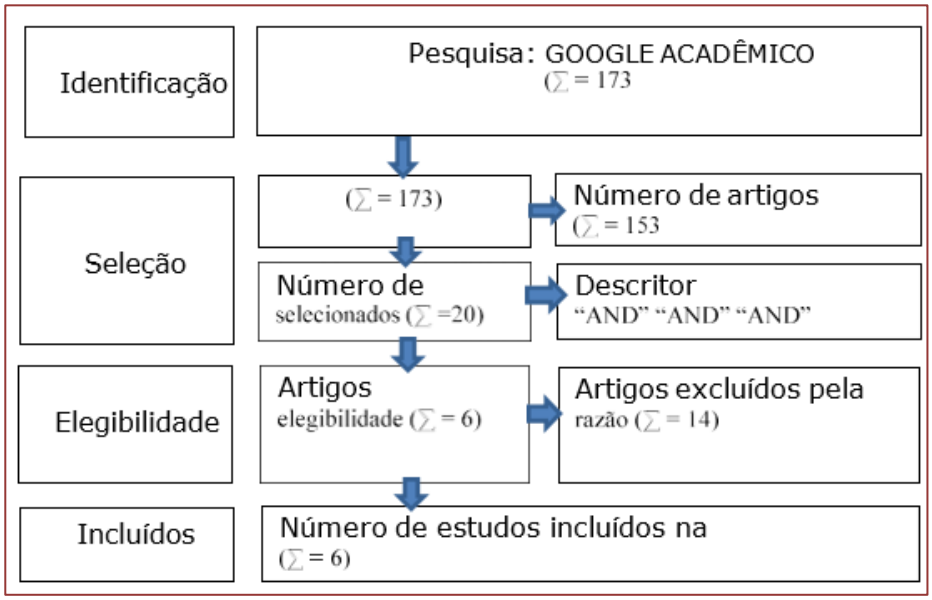
A princípio, esse estudo concentrou-se em apresentar por meio de uma revisão narrativa, os estudos sobre a termografia infravermelha usada na construção civil para encontrar manifestações patológicas. De modo geral, foram selecionados estudos realizados somente em laboratório. Para a pesquisa, aplicou-se as seguintes palavras-chave: “Termografia infravermelha”, “Edificações” e “patologias”, combinadas com o seguinte operador boleando “and” no google acadêmico atribuindo os filtros: “período específico”, “ordenar por relevância”, “pesquisar por páginas em português” e “qualquer tipo”. O período da buscar compreendeu entre 2019 e 2024.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. RESULTADOS

Utilizando a estratégia de pesquisa, foram identificados inicialmente, 173 artigos, conforme a Figura 1, utilizando o Google Académico. Dando sequência após aplicação dos filtros, restaram 20 artigos selecionados, do Google Académico. Em seguida foram lidos os títulos e os resumos, de forma que apenas 6 foram considerados elegíveis para os critérios de pesquisa, como se encontra apresentados na Figura 1.

**Figura 1 -** Diagrama de fluxo da literatura utilizada.




Fonte: elaborado pelos autores.

No quadro 2 contém as informações resumidas dos 6 artigos selecionados, envolvendo os artigos que foram feitos em laboratório.

**Quadro 2 -** Resumo dos parâmetros e resultados por estudo.

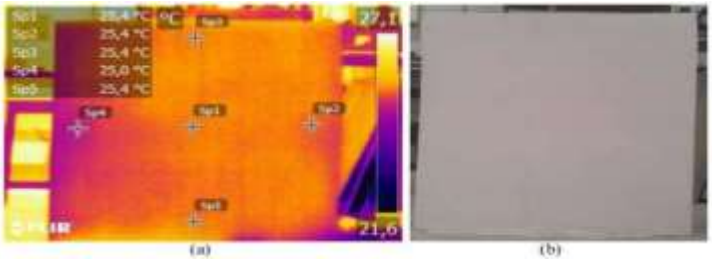
| N | REFERÊNCIAS | ANO | FOCO DA PESQUISA |
|---|---|---|---|
| 1 | Santos, Rocha e Póvoas. | 2019 | detecção de focos de umidade em paredes internas de edificações |
| 2 | Borba Junior *et al.* | 2019 | detecção de destacamento em revestimento de argamassa |
| 3 | Oliveira *et al.* | 2019 | detecção do aço em estruturas de argamassa armada |
| 4 | Silva e Araújo. | 2022 | detecção das Infiltrações da cerâmica |
| 5 | Julkovski *et al.* | 2023 | avaliação da condutividade térmica de argamassas |
| 6 | Marques *et al.* | 2024 | Identificação de corrosão em estruturas metálicas |

Fonte: elaborado pelos autores.

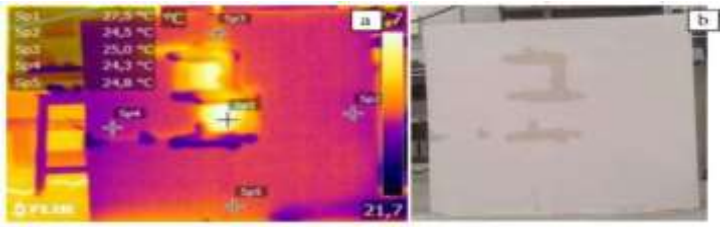
Os trabalhos em que foram reportados patologias em estruturas metálicas foram eliminados. Desta forma os resultados apresentados a seguir serão os resultados dos estudos de Santos, Rocha e Póvoas (2019), Borba Junior *et al.* (2019), Silva e Araújo (2022) e Julkovski *et al.*(2023).

Santos, Rocha e Póvoas (2019) identificaram manifestações patológicas relacionadas à infiltração em paredes de alvenaria, mediante aplicada da termografia infravermelha. Primeiro, ergueram cinco paredes de tijolos cerâmicos (19x19x19) revestidas de diferentes maneiras: sem revestimento algum, com gesso, gesso e pintura, gesso e tinta látex, gesso e tinta acrílica e gesso e placa cerâmica na frente. Foi empregada também tubulação de PVC perfurada para simular infiltração. Os resultados mostraram que a termografia pode ser uma ferramenta muito eficaz para localizar problemas ocultos de umidade acidental em edificações, desde que haja gradientes térmicos significativos entre as áreas úmidas e secas. De acordos com os seus resultados contidos nas Figuras 2 (A-D) foi possivel Observar que na Figura (2-A), a temperatura do prótipo foi de 3,8 °C, registrada após um período de 15 minutos. Enquanto que os resultados contidos na Figura (2-B), observou-se um contraste térmico evidente ao olho nu. Já a observação da Figura (2-B) evidenciou que quando a água foi aquecida resultou em gradientes de temperatura negativos ao longo das 2 horas. Por outro lado, quando a água esfriou, o contraste de temperatura das áreas secas e úmidas tornou-se evidente depois das 48 horas, resultado expresso na Figura (2-C). No final do experimento à medida que a parede foi secando, a diferença de temperatura foi diminuindo, mas as marcas da umidade continuaram conforme observa-se na Figura (2-D).

**Figura 2-** Parede B seca: (a) termograma e (b) fotografia (A). 5 minutos após a inserção de água na Parede B: (a) termograma e (b) fotografia (B). 48 horas após a inserção de água na Parede B: (a) termograma e (b) fotografia (C). 1 semana após a inserção de água na Parede B: (a) termograma e (b) fotografia (D).

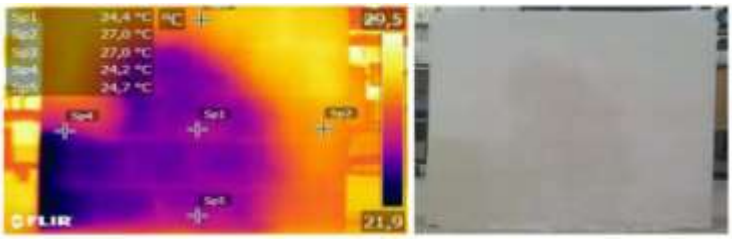


2-A

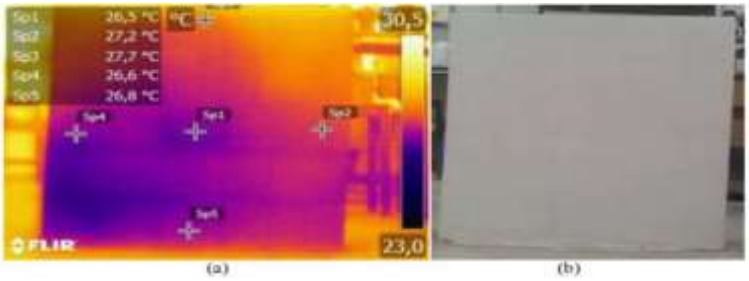


2-B

**Figura 2-** Parede B seca: (a) termograma e (b) fotografia (A). 5 minutos após a inserção de água na Parede B: (a) termograma e (b) fotografia (B). 48 horas após a inserção de água na Parede B: (a) termograma e (b) fotografia (C). 1 semana após a inserção de água na Parede B: (a) termograma e (b) fotografia (D). (continuação)



2-C



2-D

Fonte: Adaptado de Santos; Rocha; Póvoas, (2019).

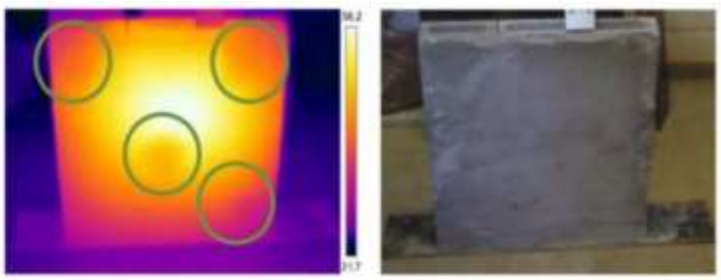
Borba Júnior *et al.* (2019) analisaram patologias no revestimento de argamassa de paredes de blocos de concreto em locais com sinais de descolamento. Ergueram-se duas paredes de concreto de vedação (9x10x39) e aplicou-se uma camada de reboco de argamassa com traço 1:4, curadas por 14 dias. Placas de isopor de 3 mm foram colocadas em diferentes pontos de uma parede para simular o deslocamento do revestimento de argamassa. As paredes foram expostas à radiação infravermelha da lâmpada incandescente industrial, conforme representada pela Figura 3. Na parede sem isopor, não havia pontos de anomalias para diferença térmica. Na parede com isopor, foram detectados pontos de anomalias. O estudo constatou que a termografia infravermelha é eficaz na identificação de revestimentos argamassados, permitindo a localização de anomalias e suas patologias.

**Figura 3** – Câmara de fornecimento de calor

Fonte: Adaptada de Borba Júnior *et al.* (2019)

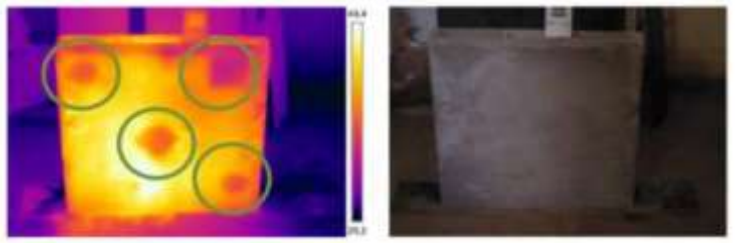
Os resultados obtidos por Borba Júnior *et al* (2019) estão contidos nas Figuras 4 (A-C). Diante da observação do termograma representado na Figura (4-A), verificou-se que, após o aquecimento identificaram que as paredes que foram molhadas na face frontal, ocorrendo o choque térmico. Enquanto que na Figura (4-B), o termograma representa a imagem sem as placas de isopor após o processo de aquecimento. Já na Figura (4-C), representam os termograma da parede com placas com isopor após serem submetidas a molhagem. Diante dos resultados contidos nas Figuras (4 A-C). Verificou-se que a diferença térmica apresentada após o aquecimento não foi de forma imediata, pois, apesar de notar as anomalias, esses pontos foram poucos perceptíveis, assim, sendo mal identificados pela termografia infravermelha. Somente após a molhagem, as falhas induzidas foram identificadas. Por apresentarem um resultado qualitativo, é possível notar as anomalias, possibilitando um diagnóstico preciso. Com isso, para a obtenção de melhores resultados, é preciso uma boa diferença de temperatura, em que a molhagem superficial torna-se viável.

**Figura 4 -**Parede com placas de isopor após o aquecimento (A). Parede sem placas de isopor após o aquecimento (B). Placas com isopor após serem submetidas a molhagem (C).

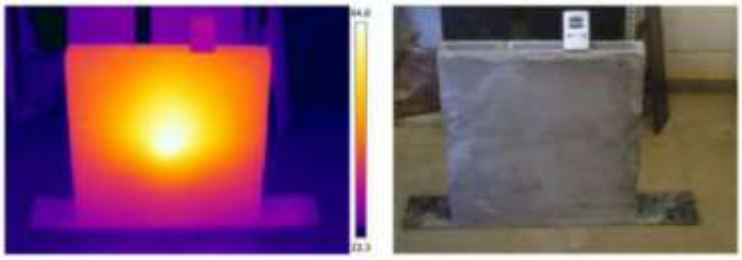


(4-A)

**Figura 4 -**Parede com placas de isopor após o aquecimento (A). Parede sem placas de isopor após o aquecimento (B). Placas com isopor após serem submetidas a molhagem (C). (continuação)



(4-B)

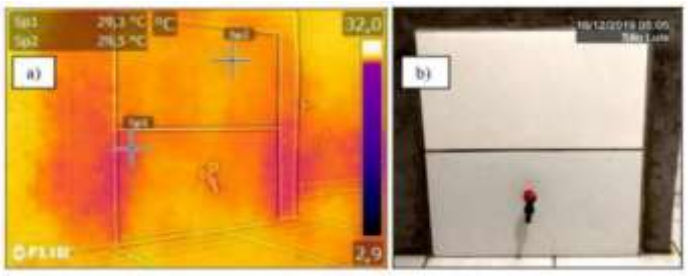


(4-C)

Fonte: Borba Júnior *et al* (2019)

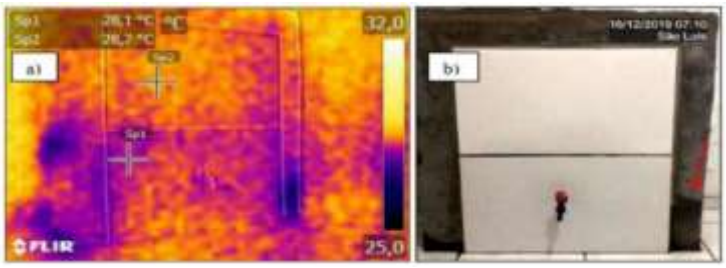
Silva e Araújo (2022) empregaram na sua proposta uma parede de alvenaria revestida de cerâmica, com o intuito de simular um vazamento hidráulico. O protótipo media 0,80 m por 0,78 m e foi feito com tijolos cerâmicos de 9 cm x 14 cm x 19 cm. Foram instaladas duas placas cerâmicas iguais, medindo 57,5 cm por 33,5 cm cada. Usou-se um tubo de PVC de 20 mm, reservatório, registro de esfera, torneira e as conexões. Nas Figura 5 A e B contém os resultados de Silva e Araújo (2022). Na Figura 5 -A evidenciou que houve diferença de temperatura entre a área mais fria, onde há umidade, e a mais quente, na área seca. Enquanto que na Figura 5-B evidenciou que houve-uma alteração significativa, em que a diferença térmica chegou aos 1,1 °C entre a cerâmica superior e a inferior.

**Figura 5 -** Gerado às 05:05 a) termograma, b) fotografia do protótipo (A). Figura 13 - Gerado às 07:10 a) termograma, b) fotografia do protótipo (B)




(5-A)

**Figura 5 -** Gerado às 05:05 a) termograma, b) fotografia do protótipo (A). Figura 13 - Gerado às 07:10 a) termograma, b) fotografia do protótipo (B) (continuação)



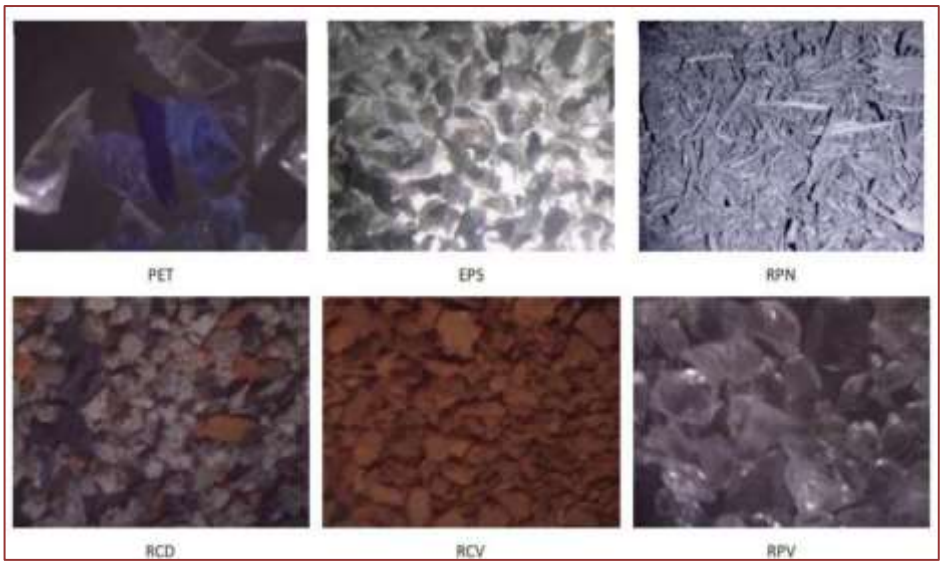

(5-B)

Fonte: Adaptado de Silva; Araújo, (2022).

Os resultados obtidos mostraram que modificar os parâmetros de emissividade e temperatura aparente refletida resultou em um erro na leitura da temperatura do objeto. Assim, para que sejam realizadas inspeções termográficas, é fundamental que se determinem experimentalmente os valores dessas incógnitas.

Julkovski *et al*. (2023) materiais provenientes de sólidos industriais foram utilizados para argamassas de revestimento, visando melhorar o desempenho térmico, e, consequentemente o menor custo em relação com os materiais convencionais. Substituiu-se 20% da areia por resíduos poliméricos e minerais provenientes da indústria. Os resíduos sólidos industriais utilizados como substituto parcial à areia foram: PET (resíduo de polietileno tereftalato), EPS (resíduo de poliestireno expandido), RPN (raspas de pneus), RCV (resíduos de cerâmica vermelha), RCD (resíduos de construção e demolição) e RPV (resíduos de vidro). Seus resultados estão representados na Figura 6 evidenciam a distribuição granulométrica dos resíduos sólidos que foram empregados como substitutos parciais.

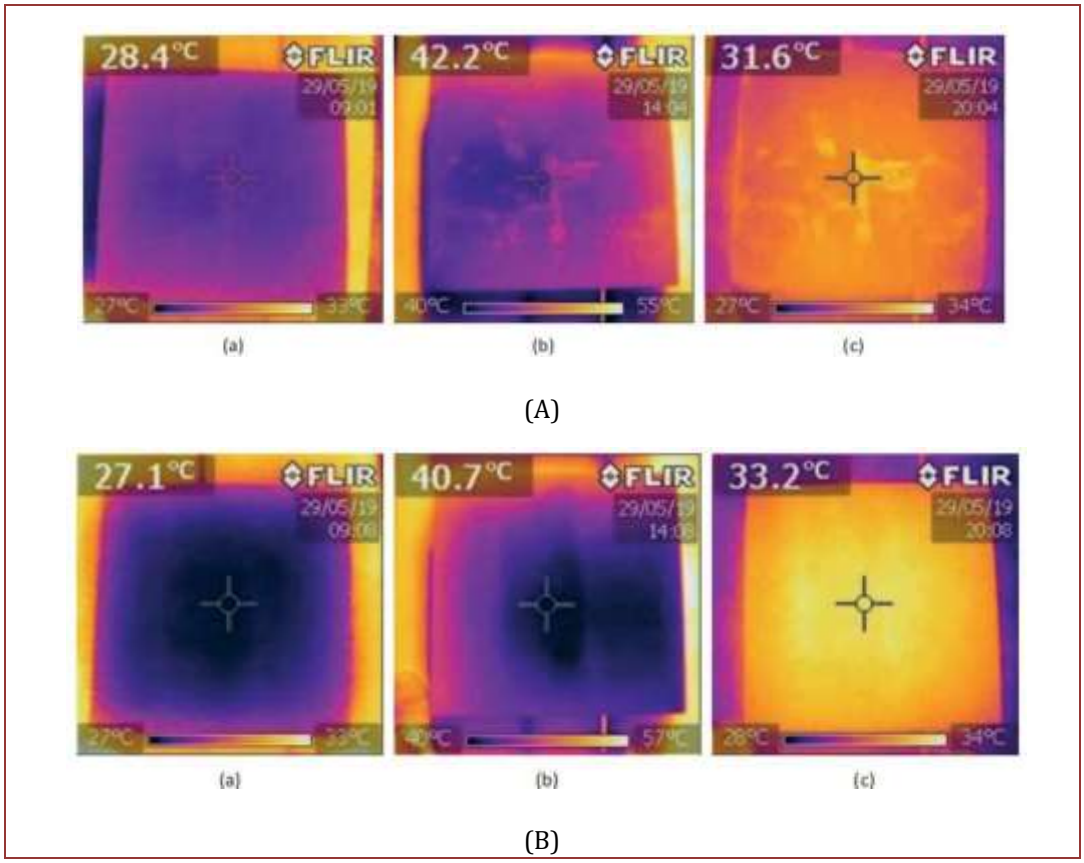
**Figura 6 -** Análise dos resíduos na lupa estereoscópica.




Fonte: Adaptado de Julkovski *et al*. (2023)

As Figuras 7 A e B ilustram as termografias executadas nas superfícies externa e interna das placas de argamassa, com o objetivo de observar as variações da temperatura superficial ao longo do dia.

**Figura 7 -** Termografias de Infravermelhos da face externa da placa de argamassa com resíduos de cerâmica vermelha (RCV): a) às 09:00 horas; b) às 14:00 horas; c) às 20:00 horas (A). Termografias de Infravermelhos da face interna da placa de argamassa com resíduos de cerâmica vermelha (RCV): a) às 09:00 horas; b) às 14:00 horas; c) às 20:00 horas (B)




Fonte: Adaptado de Julkovski *et al*. (2023).

Os resultados de Julkovski *et al*. (2023) evidenciaram que a temperatura subiu com com o passar das horas, mas que a partir 09:00 às 14:00 horas iniciam a queda até às 20h00. Além disso, a maior diferença de temperatura entre as faces interna e externa de cada placa oconteceu às 14h, com o maior aumento registrado na placa de PET.

No trabalho desenvolvido por Julkovski *et al*. (2023) materiais provenientes de sólidos industriais foram utilizados para argamassas de revestimento, visando melhorar o desempenho térmico, e, consequentemente o menor custo em relação com os materiais convencionais. Substituiu-se 20% da areia por resíduos poliméricos e minerais provenientes da indústria. Os resíduos sólidos industriais utilizados como substituto parcial à areia foram: PET (resíduo de polietileno tereftalato), EPS (resíduo de poliestireno expandido), RPN (raspas de pneus), RCV (resíduos de cerâmica vermelha), RCD (resíduos de construção e demolição) e RPV (resíduos de vidro). As amostras mostraram que a argamassa contendo resíduos de PET e pneu teve um desempenho

melhor, resultando em um menor aumento de temperatura. Diante dos resultados concluiu-se que, as argamassas compostas por resíduo de polietileno tereftalato (PET) e raspas de pneu (RPN) foram os mais indicados, por registrar uma menor elevação de temperatura em comparação com as demais, além de apresentarem um baixo coeficiente de capilaridade e maior resistência.

## 5. CONCLUSÃO

A termografia infravermelha possibilita a medição da temperatura de qualquer objeto de forma não invasiva, o que permite realizar medições em intervalos regulares e monitorar corpos em altas temperaturas ou em situações de risco.

De acordo com os resultados, observa-se que o experimento feito em laboratório é eficiente para detecção de manifestações patológicas por meio da termografia. É possível afirmar que a investigação de infiltrações é viável e que, na ausência de tratamento, provoca o aparecimento de manchas ou bolor, eflorescência, desagregação de revestimentos, forros, entre outros. Além de desencadear outras manifestações, pode culminar em uma eventual ruptura dos elementos.

Entre os principais benefícios que esta ferramenta de inspeção oferece, destaca-se o fato de que não é necessário remover uma amostra do material avaliado, o que significa que se trata de um ensaio não destrutivo. Isso possibilita a obtenção de resultados em locais de difícil acesso, como telhados, fachadas e vigas subterrâneas.

De acordo com os estudos revisados, é essencial que a análise seja minuciosamente precisa, com umidade e temperatura reflexivas dentro dos parâmetros adequados, para que se evitem falhas que poderiam comprometer os resultados, como a falta de padronização na escala de cores.

## REFERÊNCIAS

[1] ARAUJO, J. M. Curso de concreto armado. 5. ed. V. 1. Rio Grande: **Dunas,** 2003.

[2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edifícios habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16554: Ensaios não destrutivos - Termografia -Medição e compensação da transmitância de um meio atenuante utilizando câmeras termográficas.** Rio de Janeiro, 2016

[4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9573.:Vermiculita expandida — Temperaturas final e inicial de amolecimento — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

[5] BAUER, E.; LUCENAS, R. R. D.; PAVON, E. Critérios para identificação e diagnóstico de anomalias em fachadas cerâmicas através da termografia infravermelha quantitativa.**Ambiente Construído**, v. 23, p. 101-119, 2023.

[6] BORBA JÚNIOR, J. E. F. de *et al*. Utilização de termografia infravermelha como ensaio não destrutivel para detecção de destacamento em revestimento de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13., 2019. **Anais [...].***[S. l.]*, 2019. p. 293–301. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/4668. Acesso em: 20 abr. 2026.

[7] GARCIA, Jean.; ALBUQUERQUE, Paulo.; Patologias da construção. 1. ed. v. 1. Rio de Janeiro: **Livros Técnicos e científicos ltda**, 2025.

[8] JULKOVSKI, T. L. M. *et al*. Ensaios tecnológicos para avaliação da condutividade térmica de argamassas. In:**TECNOLOGIA EM CONTROLE DE OBRAS: 20 ANOS DE CONTRIBUIÇÕES DO IFMT PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Editora Científica Digital, 2023. p. 59-72.

[9] JÚNIOR BORBA, J. E.F. de *et al*. Utilização de termografia infravermelha como ensaio não destrutivel para detecção de destacamento em revestimento de argamassa. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, v. 13, p. 293-301, 2019.

[10] LI, H. Literature Review on Cool Pavement Research. Pavement Materials for Heat Island Mitigation, **Butterworth-Heinemann**, p.15-42, 2016.

[11] LUZ, J.; OLIVEIRA, I. S.; SOEIRO, M. Ensaio termográfico de edificação histórica: Igreja de Nossa Senhora da Conceição de Almofala/Thermographic test of historical heritage: Igreja de Nossa Senhora da Conceição de Almofala. **Brazilian Journal of Development,** v. 7, p. 100708-100731, 2021.

[12] MARQUES, *et al*. Identificação da corrosão em estruturas metálicas através da análise de imagens termográficas. **Tecnologia Em Metalurgia Materiais E Mineração**, 21, e2877, 2024.

[13] OLIVEIRA, L. C. *et al*. O potencial da termografia na detecção do aço em estruturas de argamassa armada. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 5, p. 2072-2084, 2019.

[14] SANTOS, C.; ROCHA, J.; PÓVOAS, Y. Utilização da termografia infravermelha para detecção de focos de umidade em paredes internas de edificações. **Ambiente Construído**, Porto alegre, v. 19 n. 1, 105–127, 2019.

[15] SILVA, B; ARAÚJO, M. Importância da precisão de parâmetros termográficos da cerâmica na detecção de infiltrações. **Revista de engenharia e tecnologia**, v. 14, n. 3, 2022.

# Capítulo 6

## Análise dos impactos causados por agrotóxicos na saúde dos trabalhadores rurais no Brasil - uma revisão narrativa

*Erick Roque Santana de Araujo*
*Alex Pereira de Sousa*
*Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira*
*Georgiana Maria Vasconcelos Martins*
*Jussara Silva Dantas*

Resumo: Nos últimos anos, a liberação e o uso de agrotóxicos têm crescido substancialmente no Brasil, motivados por um modelo de produção agrícola que muitas vezes negligencia os impactos dessas substâncias na saúde humana e no meio ambiente. A utilização indiscriminada de defensivos agrícolas pode causar a contaminação do solo e da água, afetando a capacidade produtiva, a biodiversidade e a saúde de trabalhadores rurais, que estão sujeitos a intoxicações agudas e crônicas. Os consumidores também têm sido afetados, uma vez que vários dos alimentos produzidos no país podem conter níveis inseguros de substâncias tóxicas. Diante disso, este trabalho objetivou analisar a liberação de agrotóxicos no período de 2019 a 2021, associando os possíveis impactos ambientais e sociais, com ênfase na segurança ocupacional. Foram enfatizados os aspectos de segurança ocupacional dos trabalhadores que lidam com essas substâncias, bem como foi feito um levantamento dos tipos de defensivos liberados para utilização no Brasil, mas que são proibidos em outras localidades. Explicitaram-se números alarmantes sobre a liberação de novas substâncias, incluindo pesticidas, fertilizantes e afins, entre os anos de 2019 e 2021: aproximadamente 1.500 novos produtos tiveram autorização para comercialização, o que impacta significativamente na complexidade inerente ao controle de riscos e na redução de danos. Por fim, conclui-se que os resultados deste trabalho podem auxiliar e servir de base para pesquisas que visem a tratar do tema da utilização de agrotóxicos no Brasil, a partir de um viés que enfatize a importância da sustentabilidade e de um olhar crítico acerca dos possíveis impactos à saúde do trabalhador rural.

Palavras-chave: defensivos agrícolas, impacto ambiental, segurança do trabalhador, contaminação, saúde pública.

## 1. INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por agrotóxicos constitui um tema de elevada relevância para a saúde humana e para o equilíbrio ambiental. Conforme destacam Ródio, Rosset e Brandalize (2021), a exposição a essas substâncias pode desencadear diversas patologias, tais como neoplasias, distúrbios endócrinos, neurológicos e respiratórios. Adicionalmente, a contaminação edáfica compromete a biodiversidade e a qualidade dos recursos naturais, colocando em risco a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

No Brasil, as doenças associadas aos agrotóxicos têm sido objeto de investigação há décadas. Ribeiro e Figueiredo (2021) evidenciaram que a exposição ocupacional torna os trabalhadores rurais particularmente vulneráveis, sobretudo aqueles que negligenciam o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs). Dados do Sistema Nacional de Informações Tóxico-Farmacológicas (SINITOX, 2020) corroboram essa preocupação, registrando, em 2019, 3.315 casos de intoxicação por agrotóxicos no país, o que representou um incremento de 15% em relação ao ano anterior.

O uso intensivo desses produtos químicos na agricultura brasileira visa combater pragas e doenças, porém, seus efeitos deletérios à saúde pública são alarmantes. O Instituto Nacional de Câncer (INCA, 2021) alerta que a exposição a tais produtos eleva o risco de desenvolvimento de câncer em agricultores. Paralelamente, a ABRASCO (2015) estabelece correlações entre o uso de agrotóxicos e o surgimento de doenças crônicas, como diabetes e afecções cardiovasculares, evidenciando a urgência de políticas públicas mais rigorosas.

A problemática estende-se aos consumidores e ao meio ambiente. A ANVISA (2023) revelou que mais de 70% dos alimentos consumidos no Brasil contêm resíduos de agrotóxicos. Belchior *et al*., (2017) demonstram que a utilização desses produtos causa danos severos aos ecossistemas terrestres e aquáticos, infiltrando-se no solo e causando desequilíbrio ambiental. Ademais, tais substâncias podem ser transportadas pelo vento, atingindo áreas remotas e afetando a biodiversidade, incluindo a redução de polinizadores essenciais (Barros; Junior, 2025; Weyermüller; Dewes, 2025).

Diante da necessidade de mitigar esses impactos, torna-se imperativo promover o uso sustentável da agricultura. Fontes, Souza e Spinola (2023) e Peron *et al*., (2024) apontam que a adoção de práticas agroecológicas, o manejo integrado de pragas e a agricultura orgânica são alternativas viáveis para reduzir a dependência química e preservar a saúde dos trabalhadores e do meio ambiente.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar os impactos causados na saúde dos trabalhadores rurais provenientes do uso de agrotóxicos. Para tanto, foram delineados os seguintes objetivos específicos: listar os principais novos agrotóxicos liberados no país entre 2019 e 2021; levantar quais são os principais defensivos proibidos em outros países, mas permitidos no Brasil, analisando as razões das proibições externas; analisar os impactos ambientais e na saúde do trabalhador e dos consumidores; e, por fim, propor medidas mitigadoras e compensatórias para o uso inadequado dessas substâncias no Brasil.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A "Revolução Verde", iniciada na década de 1960, promoveu avanços expressivos na agricultura mundial, resultando em um aumento significativo na produção de alimentos. Entretanto, um dos aspectos críticos desse paradigma produtivo reside na intensificação do uso de agrotóxicos. De acordo com Barboza *et al*., (2018), tais substâncias são compostos químicos empregados no controle de pragas, doenças e plantas daninhas. A disseminação desses produtos deve-se, precipuamente, à pressão por maior produtividade e à demanda crescente por alimentos. Conforme relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (POLAK, SOSIN, MARTYNIUK;2022), estima-se que o uso global de agrotóxicos tenha crescido cerca de 10% nos últimos cinco anos, suscitando preocupações globais acerca dos impactos ambientais e na saúde humana.

A persistência desses compostos no meio ambiente pode acarretar a contaminação de recursos hídricos, do solo e dos alimentos. Nascimento *et al*., (2021) alertam que a exposição crônica a agrotóxicos está associada ao risco aumentado de desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, como o mal de Parkinson, além de distúrbios endócrinos e neoplasias.

### 2.1. HISTÓRICO E CONTEXTO SOCIOAMBIENTAL NO BRASIL

O Brasil possui um histórico intrínseco ao uso de agrotóxicos, impulsionado pela modernização agrícola a partir da década de 1970. Desde então, o país consolidou-se como um dos maiores consumidores mundiais dessas substâncias. Dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2017) indicam que o consumo de agrotóxicos em território nacional aumentou mais de 300% entre os anos de 2000 e 2012. Em 2019, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2019) contabilizou mais de 400 produtos autorizados para uso agrícola.

Essa expansão gera preocupações ambientais crescentes. Lopes *et al*., (2025) destacam que a conscientização sobre os impactos antrópicos nos ecossistemas é resultado de uma interação complexa entre fatores sociais, políticos e econômicos. Aquino *et al*., (2025) reforçam que a percepção pública tem se intensificado devido à frequência de eventos climáticos extremos, evidenciando a vulnerabilidade da biodiversidade e dos recursos naturais.

Na dimensão social, a sustentabilidade é desafiada pelos efeitos nocivos na saúde das comunidades rurais. A justiça ambiental torna-se uma questão central, visto que populações vulneráveis, como agricultores familiares e comunidades tradicionais, são desproporcionalmente afetadas (Oliveira; Pacheco, 2023). Carvalho (2023) defende que a transição para práticas sustentáveis requer equilíbrio entre proteção ambiental e garantia de condições dignas de trabalho, demandando programas de capacitação e assistência técnica.

## 2.2. INTOXICAÇÃO E SUBNOTIFICAÇÃO

A exposição aos agrotóxicos pode ocorrer por ingestão, inalação ou contato dérmico, resultando em quadros de intoxicação aguda ou crônica. A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2019) caracteriza a intoxicação aguda por sintomas imediatos como náuseas, cefaleia e irritação cutânea, enquanto a exposição crônica, de efeito cumulativo, relaciona-se a patologias graves a longo prazo. Faria *et al*., (2020) enfatizam a importância de classificar a intensidade da exposição para compreender tanto os danos imediatos ao sistema nervoso quanto os riscos futuros de doenças crônicas e neoplasias.

Um obstáculo significativo para a saúde pública é a subnotificação dos casos. A partir do final de 2019, observou-se uma preocupante defasagem nos registros, muitas vezes decorrente da falta de capacitação dos profissionais de saúde para identificar sintomas relacionados à exposição química (Oliveira, 2019). Essa lacuna nos dados do Sistema Nacional de Informações Tóxico-Farmacológicas (SINITOX) compromete o dimensionamento real do problema e a formulação de políticas públicas eficazes, evidenciando a necessidade urgente de vigilância epidemiológica e educação continuada (Zanette, 2024).

## 3. METODOLOGIA

Quanto aos objetivos, a presente pesquisa classifica-se como descritiva (Gil, 2002), uma vez que busca estabelecer a correlação entre o aumento da liberação de agrotóxicos e seus subsequentes impactos ambientais e sociais. No que tange à natureza, adota-se uma abordagem quanti-qualitativa, visando não apenas a análise estatística dos dados, mas também a compreensão do contexto histórico-social do problema. Referente ao objeto de estudo, constitui-se uma pesquisa bibliográfica que, segundo Marconi e Lakatos (2004), é parte intrínseca do trabalho científico e possibilita a geração de resultados inovadores.

O levantamento de dados foi realizado no acervo da biblioteca da Universidade Federal de Campina Grande (Campus Pombal/PB) e em bases de dados indexadas, nomeadamente: Scientific Electronic Library Online (SciELO), Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS) e PubMed. A busca pelos artigos foi conduzida mediante o uso de descritores em língua inglesa: "agrochemicals and health", "agrochemicals and soil poisoning", "agrochemicals and water poisoning", "agrochemicals and environment impact" e "agrochemicals and safety measures". Como critério de inclusão, selecionaram-se publicações (artigos, livros, periódicos, trabalhos de conclusão de curso) com data de publicação de, no máximo, cinco anos anteriores à realização do estudo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são analisados e discutidos os dados referentes à liberação de novos agrotóxicos no Brasil, os potenciais impactos socioambientais desses produtos e o levantamento de medidas de redução de riscos e compensação.

## 4.1. LIBERAÇÃO DE NOVOS AGROTÓXICOS NO BRASIL (2019-2021)

O uso de agrotóxicos no Brasil tem sido objeto de intensos debates. Entre 2019 e 2021, o país vivenciou um aumento significativo na liberação de novos registros, impulsionado por mudanças regulatórias e pela demanda do setor agrícola por novas ferramentas de controle de pragas (Silva *et al*., 2022). A seguir, destacam-se os principais ativos liberados no período, conforme levantamento realizado.

No ano de 2019, foram aprovados 474 produtos. Dentre os destaques, o Florpirauxifen-benzil apresenta-se como um herbicida para arroz e soja, conhecido por sua eficiência e rapidez de ação (Plodoviski, 2024). A Sulfentrazona, utilizada em cana-de-açúcar e café, destaca-se pelo controle residual, inibindo a enzima protoporfirinogênio oxidase (Magalhães *et al*., 2012). O Dicloropropeno é aplicado como nematicida em tomate e batata, embora exija cuidados devido à alta toxicidade e volatilidade (Charchar *et al*., 2007). O inseticida Metomil é eficaz em diversas culturas, mas apresenta riscos a polinizadores, exigindo uso rigoroso de EPIs (Garcia e De Lara, 2020). Por fim, o FENOXAPROP-P-ETÍLICO atua na inibição da síntese de ácidos graxos em gramíneas, sendo vital a gestão integrada para evitar resistência (Rigon, 2019).

Em 2020, com 493 aprovações, destacou-se o Dicamba, herbicida para soja transgênica que tem gerado debates sobre deriva e danos a culturas vizinhas (Miranda, De Oliveira e Cabral, 2024). O Clorpirifós, embora banido em vários países por riscos neurotóxicos, manteve-se permitido com restrições (Medeiros, Acayaba, Montagner, 2021). O Glufosinato de amônio foi promovido como alternativa ao glifosato, inibindo a síntese de glutamina (Do Carmo *et al*., 2023). O Espinetoram surgiu como opção de menor impacto ambiental para frutas e vegetais (Ripke, 2022), enquanto o Fipronil, usado em pragas de solo, levantou preocupações sobre a mortalidade de abelhas (Silva, Della Torre, De Camargo Matos, 2021).

No ano de 2021, a tendência manteve-se com 562 liberações (Salati, 2022). O Benzoato de emamectina consolidou-se no controle de lagartas, atuando como neurotoxina, apesar da toxicidade potencial (Prado et al., 2021). O Cletodim foi indicado para controle de gramíneas, auxiliando na rotação de culturas para reduzir resistência (Kuhn, 2025). O Imidacloprido, um neonicotinoide eficaz contra insetos sugadores, continuou sendo associado a impactos negativos sobre polinizadores (Pereira *et al.*, 2019).

## 4.2. ASSIMETRIAS REGULATÓRIAS INTERNACIONAIS

A disparidade nas regulamentações entre o Brasil e outros países reflete prioridades divergentes. Enquanto a União Europeia e os Estados Unidos adotam abordagens preventivas focadas na saúde e no meio ambiente, o Brasil tende a uma regulação mais permissiva, influenciada por fatores econômicos (Silva *et al.*, 2022; Almeida et al., 2000). A Tabela 1 apresenta substâncias permitidas no Brasil que enfrentam restrições internacionais.

**Tabela 1.** Agrotóxicos proibidos internacionalmente e liberados no Brasil

| Nome | Proibição Internacional | Situação no Brasil |
|---|---|---|
| Paraquat | Proibido em diversos países devido à sua alta toxicidade e riscos à saúde humana (ECHA, 2007). | Continua sendo amplamente utilizado, especialmente em culturas como o algodão e a soja. |
| Atrazina | Banida em vários países devido à contaminação de águas subterrâneas e impactos negativos sobre a vida aquática (European Commission, 2020). | Permanece sendo um dos agrotóxicos mais utilizados, especialmente em plantações de milho e cana-de-açúcar. |
| Glifosato | Restrito ou banido em alguns países devido a preocupações com a saúde humana e o meio ambiente (Lyon, 1994). | Amplamente utilizado e controverso devido às suas supostas ligações com problemas de saúde e impactos ambientais. |
| Endossulfano | Banido globalmente pela Convenção de Estocolmo devido aos seus efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente (Prado, 2021). | Embora tenha sido proibido em 2013, ainda é utilizado ilegalmente em algumas regiões do país. |
| Carbofurano | Proibido em muitos países devido à sua alta toxicidade para humanos e animais (European Commission, 2020). | Ainda é utilizado em algumas culturas, apesar de restrições impostas. |
| Clorpirifós | Banido na União Europeia e nos Estados Unidos devido a preocupações com a saúde humana, especialmente em crianças (EPA, 2019). | Continua sendo utilizado, principalmente na agricultura. Embora tenham novas evidencias de que causa danos ao cérebro de crianças. |
| Metamidofós | Proibido em muitos países devido à sua alta toxicidade aguda (ANVISA, 2012). | Embora tenha sido proibido em 2012, ainda é encontrado em uso ilegal em algumas áreas. |
| Tiametoxam | Restrito na União Europeia devido a preocupações com a saúde das abelhas (EFSA, 2018). | Ainda é permitido e utilizado em várias culturas. |
| Aceforo | Banido na União Europeia devido a preocupações com a saúde humana e o meio ambiente (EFSA, 2015). | Ainda permitido e utilizado em diversas culturas. |
| Triclorfom | Banido na União Europeia devido a preocupações com a saúde humana e ambiental (European Commission, 2007). | Ainda é utilizado, especialmente em culturas como o algodão e o milho. |

Fonte: elaborado pelos autores.

## 4.3. ANÁLISE DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

A utilização excessiva de agrotóxicos gera passivos ambientais significativos. A persistência de compostos no solo pode alterar a microbiota e a ciclagem de nutrientes (Dos Santos Rodrigues et al., 2020), enquanto a lixiviação contamina águas subterrâneas e superficiais (Silva et al., 2022). Albring, Ceolin e Da Costa (2023) alertam para a bioacumulação na cadeia alimentar e a mortalidade de espécies sensíveis.

No âmbito da saúde, os trabalhadores rurais representam o grupo mais vulnerável. A falta de treinamento adequado no uso de EPIs agrava o risco de intoxicações agudas e crônicas (Vecchi & Penacci, 2024). Araujo (2019), em estudo no sertão da Paraíba, identificou sintomas como tontura e irritação ocular em trabalhadores que, mesmo cientes da periculosidade, realizavam o manejo deficitário dos produtos. Além disso, a contaminação atinge consumidores e familiares, com evidências de malformações congênitas e distúrbios neurocomportamentais (Silva et al., 2022).

## 4.4. MEDIDAS MITIGADORAS E COMPENSATÓRIAS

Diante do cenário exposto, torna-se imperativo a implementação de estratégias de mitigação. A Tabela 2 sintetiza medidas compensatórias identificadas na literatura.

**Tabela 2.** Medidas compensatórias para o uso de agrotóxicos

| Proposta | Descrição |
|---|---|
| Compensação Ambiental | A compensação ambiental é uma estratégia para minimizar os danos causados pelo uso inadequado de agrotóxicos. A restauração de áreas degradadas, a criação de reservas naturais e a proteção de nascentes são exemplos de ações que podem ser implementadas como contrapartida ao impacto ambiental (FEIL, SINDELAR, MACIEL., 2022). Projetos de pagamento por serviços ambientais (PSA) podem incentivar proprietários rurais a adotarem práticas mais sustentáveis e preservarem áreas de importância ecológica (De Sousa *et al.*, 2025). |
| Restauração de Áreas Degradadas | A restauração de áreas degradadas envolve a recuperação de ecossistemas que foram danificados pelo uso intensivo de agrotóxicos. Técnicas de revegetação, controle de erosão e recuperação de solos podem ser aplicadas para restaurar a funcionalidade ecológica dessas áreas (Da Silva, 2023). |
| Criação de Reservas Naturais | A criação de reservas naturais pode proteger habitats sensíveis e espécies ameaçadas, proporcionando refúgios onde a biodiversidade pode prosperar sem a ameaça dos agrotóxicos. Essas áreas também podem servir como zonas tampão, mitigando a dispersão de agrotóxicos para áreas adjacentes (LAMIM-GUEDES, 2021). |
| Proteção de Nascentes | A proteção de nascentes é crucial para garantir a qualidade da água e a integridade dos ecossistemas aquáticos. Medidas como a recuperação da vegetação ripária e o controle de fontes de poluição agrícola podem ajudar a preservar esses recursos hídricos vitais (DA SILVA, DA SILVA FREIRE, CORREA; 2025). |
| Assistência à Saúde | A exposição a agrotóxicos está associada a diversos problemas de saúde, como intoxicações agudas e crônicas, doenças respiratórias e câncer (Carneiro *et al.,* 2012). Portanto, é crucial oferecer assistência médica adequada às populações afetadas. Programas de monitoramento de saúde ocupacional e ambiental, além de campanhas de conscientização sobre os riscos à saúde, podem ajudar a mitigar os efeitos adversos dos agrotóxicos (Vecchi & Penacci, 2024). |
| Monitoramento de Saúde Ocupacional | Programas de monitoramento de saúde ocupacional são essenciais para identificar e tratar precocemente os efeitos adversos da exposição a agrotóxicos. Esses programas devem incluir exames periódicos, acompanhamento médico contínuo e a implementação de medidas preventivas no ambiente de trabalho (Nogueira, Szwarcwald e Damacena, 2020). |
| Campanhas de Conscientização sobre Saúde | Campanhas de conscientização sobre saúde podem informar trabalhadores rurais e comunidades sobre os riscos associados ao uso de agrotóxicos e as medidas de proteção disponíveis. Essas campanhas devem ser acessíveis e adaptadas às realidades locais, utilizando linguagem clara e recursos visuais para garantir a compreensão (Da Silva *et al*., 2024). |
| Políticas de Reparação | Implementar políticas de reparação para comunidades afetadas pelos impactos negativos dos agrotóxicos é uma medida compensatória essencial. Essas políticas podem incluir indenizações financeiras, projetos de desenvolvimento comunitário e a melhoria da infraestrutura local (Augusto *et al.*, 2024). A criação de fundos específicos para apoiar essas ações, financiados por taxas sobre a venda de agrotóxicos, pode garantir recursos suficientes para a implementação dessas medidas (Da Silva *et al.*, 2024). |

**Tabela 2.** Medidas compensatórias para o uso de agrotóxicos (continuação)

| Proposta | Descrição |
|---|---|
| Indenizações Financeiras | Indenizações financeiras podem compensar as perdas econômicas e os danos à saúde causados pelo uso inadequado de agrotóxicos. Essas compensações devem ser justas e proporcionais ao impacto sofrido, e devem ser acompanhadas por um processo transparente e eficiente de avaliação e distribuição (Lima, 2025). |
| Projetos de Desenvolvimento Comunitário | Projetos de desenvolvimento comunitário podem fortalecer a resiliência das comunidades afetadas, promovendo a diversificação econômica e a melhoria das condições de vida. Esses projetos podem incluir iniciativas de agricultura sustentável, programas de geração de renda e capacitação profissional (De Carvalho Vieira, 2025). |
| Melhoria da Infraestrutura Local | A melhoria da infraestrutura local, como acesso a água potável, saneamento básico e serviços de saúde, é fundamental para mitigar os impactos negativos dos agrotóxicos nas comunidades. Investimentos em infraestrutura podem melhorar a qualidade de vida e reduzir a vulnerabilidade a riscos ambientais e de saúde (Da Silva Pereira, 2024). |

Fonte: Elaborada pelos autores.

A implementação dessas medidas enfrenta desafios como a resistência política de setores do agronegócio e a escassez de recursos para fiscalização (Da Silva Júnior e De Andrade., 2024). Contudo, o fortalecimento da sociedade civil e o investimento em pesquisa de alternativas sustentáveis, como o Manejo Integrado de Pragas (MIP) e defensivos biológicos (Colmenarez *et al*., 2016), são caminhos essenciais para a redução dos impactos.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho evidenciou, por meio de pesquisa bibliográfica, que a liberação e o uso de agrotóxicos no Brasil apresentaram um crescimento significativo nos últimos anos, suscitando preocupações legítimas quanto aos impactos decorrentes de sua aplicação indiscriminada. Demonstrou-se que a utilização intensiva desses produtos químicos pode implicar severos danos ambientais e comprometer a saúde de trabalhadores rurais, de comunidades agrícolas e dos consumidores finais.

Os dados levantados revelam um cenário alarmante: entre os anos de 2019 e 2021, aproximadamente 1.500 novos produtos, incluindo pesticidas e fertilizantes, obtiveram autorização para comercialização. Esse volume elevado impacta diretamente a complexidade do controle de riscos e dificulta a implementação de estratégias eficazes de redução de danos. Observa-se uma correlação direta entre esse avanço e a priorização da produtividade agrícola, muitas vezes em detrimento de políticas efetivas de preservação ambiental e proteção à saúde ocupacional.

No que tange à comparação internacional, identificaram-se assimetrias críticas. Constatou-se a permissividade no Brasil para a comercialização de substâncias já proibições no exterior, bem como diferenças substanciais no enfoque regulatório, que, em países desenvolvidos, tende a ser mais rígido e contar com maior participação da sociedade civil.

Ao elencar medidas mitigadoras e compensatórias, este estudo sublinhou o desafio considerável que o país enfrenta para gerir os passivos gerados pelo modelo agrícola vigente. Conclui-se que os resultados aqui apresentados podem fundamentar futuras

investigações que abordem a utilização de agrotóxicos sob a ótica da sustentabilidade e da saúde do trabalhador rural. Sugere-se, para trabalhos futuros, a realização de revisões sistemáticas para o monitoramento das substâncias citadas, bem como pesquisas de campo focadas na realidade específica dos trabalhadores do sertão paraibano.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a agência financiadora CAPES e aos Programas de Pós-Graduação PPGGSA e PPGSA/UFCG.

## REFERÊNCIAS

[1] ALBRING, K. M. F.; CEOLIN, S.; DA COSTA, A. R. Exposição à agrotóxicos e câncer: Revisão integrativa de literatura. Research, Society and Development, v. 12, n. 9, p. e13412943294-e13412943294, 2023.

[2] ALMEIDA, D.L.; AZEVEDO, M. S. F. R.; CARDOSO, M. O.; DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M.; MEDEIROS, C. A. B.; NEVES, M. C. P.; NUNES, M. U. C.; RODRIGUES, H. R.; SAMINEZ, T. C. O.; VIEIRA, R. C. M. Agricultura Orgânica: Instrumento para a Sustentabilidade dos Sistemas de Produção e Valoração de Produtos Agropecuários. Seropédica: **Embrapa Agrobiologia**, dez. 2000. 22 p.

[3] ANVISA. **Glifosato: avaliação de risco**. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br.

[4] ANVISA. Agrotóxico metamidofós não pode mais ser vendido no Brasil, 2012. Disponível em: https://antigo.anvisa.gov.br/resultado-de-busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=2665578&_101_type=content&_101_groupId=219201&_101_urlTitle=agrotoxico-metamidofos-nao-pode-mais-ser-vendido-no-brasil&inheritRedirect=true

[5] ANVISA. **Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos**. [s. l.], 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br.

[6] AQUINO, R. N. de; NASCIMENTO, G. S. do; CARDOSO, M. do N.; TOLENTINO, J. P. de C. Alterações na disponibilidade hídrica: uma análise da percepção ambiental da população na Amazônia Ocidental. **Revista REGEO**, São José dos Pinhais, v. 16, n. 5, p. 1-17, 2025.

[7] ARAUJO, E. R. S. **Utilização de agrotóxicos: conhecimentos, práticas e impacto na saúde do trabalhador**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Superior de Tecnologia em Segurança no Trabalho) - Instituto Federal da Paraíba, Campus Patos, 2019.

[8] AUGUSTO, Lia Giraldo da Silva; KUHN, Marla Fernanda; LUCCHESE, Geraldo;

[9] QUITÉRIO, Luiz Antônio Dias. Dossiê danos dos agrotóxicos na saúde reprodutiva [livro eletrônico]: conhecer e agir em defesa da vida. editores Associação Brasileira de Saúde Coletiva (Abrasco), Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca (ENSP). Rio de Janeiro : Ed. dos Autores, 2024.

[10] BARBOZA, H. T. G.; NASCIMENTO, X. P. R.; FREITAS-SILVA, O.; SOARES, A. G.; DACOSTA, J. B. N. Compostos organofosforados e seu papel na agricultura. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 172-193, 2018.

[11] BARROS, M. A. S.; JUNIOR, E. C. de A. Avaliação espacial da contaminação ambiental por agrotóxicos no município de Petrolina-PE. **Revista Aracê**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 7, p. 38165-38226, 2025.

[12] BELCHIOR, D. C. V.; SARAIVA, A. de S.; LÓPEZ, A. M. C.; SCHEIDT, G. N. Impactos de agrotóxicos sobre o meio ambiente e a saúde humana. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 135-151, 2017.

[13] BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Relatório de Registro de Agrotóxicos**. [s.l.]: 2019.

[14] Carneiro, F F; Pignati, W; Rigotto, R M; Augusto, L G S. Rizollo, A; Muller, N M; Alexandre, V P. Friedrich, K; Mello, M S C. Dossiê ABRASCO –Um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. ABRASCO, Rio de Janeiro, abril de 2012. 1ª Parte. 98p

[15] CARVALHO, M. E. da S. S. O direito ao trabalho decente e à proteção social de coletoras e coletores de reutilizáveis e recicláveis: caminhos para uma transição ecológica justa e inclusiva no Brasil. **UNISANTA Law and Social Science**, v. 12, n. 1, p. 312-326, 2023.

[16] CHARCHAR, João M. et al. Efeitos de nematicidas fumigantes e não fumigantes no controle de Meloidogyne spp. em batata e cenoura. Nematologia Brasileira, v. 31, n. 2, p. 59-66, 2007.

[17] COLMENAREZ, Yelitza C. et al. Uso do manejo integrado de pragas e controle biológico pelos agricultores na América Latina e no Caribe: Desafios e oportunidades. Defensivos agrícolas naturais: uso e perspectivas, v. 1, p. 802-853, 2016.

[18] DA SILVA, Cynara Pessôa Fontes et al. 14. AGRICULTURA FAMILIAR E POLÍTICAS DE SAÚDE: O ESTADO NA PROTEÇÃO CONTRA AGROTÓXICO. 21 a 23 de novembro de 2024 EMESCAM Comissão de organização, p. 27, 2024.

[19] DA SILVA JÚNIOR, Oberdan Martins; DE ANDRADE, Maxwel Mota. A importância do compliance ambiental no agronegócio brasileiro: Riscos, desafios e oportunidades. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 10, n. 11, p. 3250-3266, 2024.

[20] DA SILVA, M. A. P. Técnicas e tecnologias para recuperação de áreas degradadas. Editora Senac São Paulo, 2023.

[21] DA SILVA, P. A.; DA SILVA FREIRE, L.; CORREA, R. F. R. RECUPERAÇÃO DE NASCENTES E MATAS CILIARES COMO ESTRATÉGIA DE PROTEÇÃO DOS MANANCIAIS. Revista de Geopolítica, v. 16, n. 5, p. e1141-e1141, 2025.

[22] DA SILVA PEREIRA, Jessiane et al. SAÚDE E SANEAMENTO BÁSICO: ALGUMAS REFLEXÕES. UÁQUIRI-Revista do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre, v. 6, n. 1, 2024.

[23] DE CARVALHO VIEIRA, Anderson Nunes. Desenvolvimento Rural Sustentável para a Agricultura Familiar: Um enfoque econômico, social e ambiental. Freitas Bastos, 2025.

[24] DE HOLANDA RODRIGUES, Joaquim; DE VASCONCELOS, Wagner Eustáquio; DE LIMA, Waléria Guerreiro. PERFIS AMBIENTAL E TOXICOLÓGICO DOS AGROTÓXICOS LIBERADOS NO BRASIL NOS ÚLTIMOS ANOS. Revista DCS, v. 23, n. 86, p. e4170-e4170, 2026.

[25] DE SOUZA, O. de P. S. et al. PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS: A CONTRIBUIÇÃO DO DIREITO AMBIENTAL PARA A SUSTENTABILIDADE. Editora Impacto Científico, p. 1217-1243, 2025

[26] DO CARMO, Gleidson Lino et al. Uso de Glufosinato de Amônio e Diquat em dessecação de campo na cultura de soja. Brazilian Journal of Science, v. 2, n. 4, p. 54-63, 2023.

[27] DOS SANTOS RODRIGUES, M., LOBATO BARROS, A., DOS SANTOS MELO, G. K., MARDEGAN SANGIORGIO, V., BRIGATTO ALBINO, U. & GONÇALVES GARCIA, M. (2020). EFEITO DE AGROTÓXICOS SOBRE A MICROBIOTA DO SOLO. Revista Multidisciplinar De Educação E Meio Ambiente, 1(2), 38. Disponível em: https://editoraime.com.br/revistas/rema/article/view/411

[28] ECHA (Agência Europeia dos Produtos Químicos). **Paraquat**. [s.l]: 2007.

[29] EFSA-European Food Safety Authority, "Peer review of the pesticide risk assessment for bees for the active substance clothianidin considering the uses as seed treatments and granules", EFSA Journal, vol. 16, iss. 2, February 2018, pp. e05177.

[30] EFSA-European Food Safety Authority. Annual Report. 2015. Disponível em: https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/corporate_publications/files/ar2015.pdf

[31] EPA, 2019 – Disponível em: https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/chlorpyrifos

[32] EUROPEAN COMMISSION. Paraquat. Europe, 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticidesdatabase/public/?event=activesubstance.detail&language=EN&selectedID=1669

[33] European Commission. Official Journal of the European Union. COMMISSION DECISION of 21 May 2007. concerning the non-inclusion of trichlorfon in Annex I to Council Directive 91/414/EEC and the

withdrawal of authorisations for plant protection products containing that substance. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:133:0042:0043:EN:PDF

[34] FAO. **The State of Food and Agriculture**. [s. l.], 2020.

[35] FARIA, N. B.; CASTELLI, L. S.; SILVESTRE, G. C. S. B.; SILVA, A. M. C. da. Intoxicações Agudas e Exposições aos Agrotóxicos. In: SILVA, C. A. L. da; SOUZA, M. D. de; JUNIOR, O. B. P.; FERNANDES, V.; BITTENCOURT, W. S. **Uma visão interdisciplinar sobre os IMPACTOS DOS FATORES AMBIENTAIS NA SAÚDE HUMANA**. Londrina: Científica, 2020. p. 13-20. ISBN 978-65-00-13009-6.

[36] FEIL, A. A., SINDELAR, F. C. W., MACIEL, M. J.(Org.). Sistemas ambientais sustentáveis, – Lajeado: Editora Univates, 2022. 281 p. ISBN 978-65-86648-65-2

[37] FONTES, C. L. A.; SOUZA, L. N. de; SPINOLA, C. de A. Prática agroecológica em um contexto marcado pela degradação do meio ambiente: análise de uma experiência na Chapada Diamantina-Bahia. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, Salvador, p. 447-474, 2023.

[38] GARCIA, Simone Domingues; DE LARA, Taynah Ivanir da Costa. O impacto do uso dos agrotóxicos na saúde pública: revisão de literatura. Saúde e Desenvolvimento Humano, v. 8, n. 1, p. 85-96, 2020.

[39] GIL, Antonio Carlos et al. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2002.

[40] IBAMA; MMA. Boletim de Comercialização de Agrotóxicos e Afins. (s.d). Disponível em: < https://www.icict.fiocruz.br/sites/www.icict.fiocruz. br/files/IBAMA_boletim%20de%20comercializacao_2000_2012.pdf> Acesso em 10 mar. 2017.

[41] Instituto Nacional do Câncer (INCA). **Relatório final do estudo sobre os agrotóxicos, alimentação e câncer**. [s. l.], 2021.

[42] JACOB, C. R. de O. Impacto de inseticidas neonicotinoides em abelhas africanizadas e nativas sem ferrão (Hymenoptera: Apoidea): toxicidade, alterações na atividade de locomoção e riqueza de espécies em pomares de citros. 2019. Tese (Doutorado em Entomologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2019.

[43] KUHN, Thauhana Cássia Gasparotto. Manejo de doenças da soja em sistema de rotação de culturas com arroz irrigado em diferentes condições edafoclimáticas. 2025.

[44] LAMIM-GUEDES, V. Conservação da biodiversidade em áreas protegidas: educação ambiental e serviços ecossistêmicos. Educação Ambiental em Ação, v. 12, n. 47, 2021.

[45] LYON, France. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Some industrial chemicals, v. 60, p. 389-433, 1994.

[46] LIMA, Ana Leticia de Souza. O DANO AMBIENTAL E A FUNÇÃO INDENIZATÓRIA SOB A ÓTICA DA ANÁLISE ECONÔMICA DO DIREITO: DA COMPENSAÇÃO À APLICAÇÃO DA FUNÇÃO PUNITIVA. Portal de Trabalhos Acadêmicos, v. 18, n. 1, 2025.

[47] LOPES, A. A. et al. Ecologia, meio ambiente e sustentabilidade: os impactos das ações antrópicas nos ecossistemas. **Revista DCS**, v. 22, n. 81, p. 1-13, 2025.

[48] MAGALHÃES, C.E.O., RONCHI, C.P., RUAS, R.A.A., SILVA. M.A.A., ARAÚJO, F.C. e ALMEIDA, W.L. Seletividade e controle de plantas daninhas com oxyfluorfen e sulfentrazone na implantação de lavoura de café. Planta Daninha, Viçosa-MG, v. 30, n. 3, p. 607-616, 2012.

[49] MARCONI, M. de A.; LAKATOS, Eva Maria. Metodologia científica. São Paulo: Atlas, 2004.

[50] MEDEIROS, Jéssyca Ferreira de; ACAYABA, Raphael D.'Anna; MONTAGNER, Cassiana Carolina. A química na avaliação do impacto à saúde humana diante da exposição aos pesticidas. Química Nova, v. 44, p. 584-598, 2021.

[51] MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). Secretaria de Política Agrícola. Projeções do Agronegócio: Brasil 2018/19 a 2028/29, projeções de longo prazo. Brasília, 2019. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politicaagricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2018-2019-2028-2029/

[52] MIRANDA, Celeni; DE OLIVEIRA, Raquel Maria; CABRAL, João Batista Pereira. Uso de agrotóxicos na agricultura familiar em monocultivos e policultivos no sudoeste de goiás. Editora CRV, 2024.

[53] MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes**. [s.l.]: 2004.

[54] NASCIMENTO, B. P. do; SILVA, R. C. G. F. da; FERREIRA, A. P.; SILVA, E. C. da; JUNIOR, J. A. de F.; DIAS, L. L. de O.; CAMPOS, P. H. N.; SILVA, A. M. C. da. Impacto ambiental sobre a saúde humana devido à exposição aos agrotóxicos. **Uniciências**, Cuiabá, v. 25, n. 1, p. 44-56, 2021.

[55] Nogueira, F. A. M., Szwarcwald, C. L. e Damacena, G. N. Exposição a agrotóxicos e agravos à saúde em trabalhadores agrícolas: o que revela a literatura? Rev. bras. saúde ocup. 4, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2317-6369000041118.

[56] OLIVEIRA, L. C. de; PACHECO, C. S. G. R. Agroecologia e justiça ambiental no semiárido: dialogando sobre desigualdades socioambientais. **Peer Review**, v. 5, n. 20, p. 1-17, 2023.

[57] OLIVEIRA, R. M. As percepções dos agentes penitenciários sobre a política de saúde voltada ao trabalhador do cárcere. 2019. Disponível em:http://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/1793.

[58] PERON, I. B. et al. Diferenças entre agroecologia, agricultura orgânica e transição agroecológica. **Tópicos em Gestão Ambiental**, v. 3, p. 44-82, 2024.

[59] PLODOVISKI, Gabriel Correia et al. Efeito residual de herbicidas auxínicos aplicados na pré-semeadura da linhaça dourada para manejo de plantas dicotiledôneas. REVISTA DELOS, v. 17, n. 61, p. e2601-e2601, 2024.

[60] POLAK, Grażyna; SOSIN, Ewa; MARTYNIUK, Elżbieta. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture: what it does and how it supports the livestock sector. Animal Science and Genetics, v. 18, n. 4, 2022.

[61] Prado, J. A. F., Siegloch, A. E., Silva, B. D., & Agostinetto, L. (2021). Exposição de trabalhadores rurais aos agrotóxicos. Gaia Scien, 15(1), 141-57.

[62] RIBEIRO, A. F.; FIGUEIREDO, S. C. G. de. A importância do uso de equipamentos de proteção individual aos trabalhadores rurais: Uso de agrotóxicos na Agricultura. **Segurança e Gestão**: A multidisciplinaridade e os avanços tecnológicos, Belo Horizonte, v. 1, ed. 1, p. 49-55, 2021.

[63] RIGON, Carlos Alberto Gonsiorkiewicz. Uso recorrente de protetor e misturas de herbicidas em subdoses aumenta a sobrevivência de Echinochloa crus-galli. 2019.

[64] RIPKE, Marcia Orth. Resíduos de agrotóxicos em alimentos vegetais in natura em feiras livres e a percepção dos produtores e consumidores. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Brazil).

[65] RÓDIO, G. R.; ROSSET, I. G.; BRANDALIZE, A. P. C. Exposição a agrotóxicos e suas consequências para a saúde humana. **Research, Society and Developmen**, v. 10, n. 8, p. 1-30, 2021.

[66] SALATI, Paula. **Após novo recorde, Brasil encerra 2021 com 562 agrotóxicos liberados, sendo 33 inéditos**. G1, [s. l.], 18 jan. 2022.

[67] SILVA, Thiago Henrique Costa et al. O uso indiscriminado de agrotóxicos na agricultura, seus impactos na saúde do trabalhador rural e a consequente responsabilidade civil no Brasil. Revista de Direito Sanitário, v. 22, n. 2, p. e0007-e0007, 2022.

[68] SILVA, Renan do Carmo Marinho; DELLA TORRE, Priscila Aparecida; DE CAMARGO MATOS, Janara. O uso incorreto do inseticida fipronil e sua influência na morte das abelhas no sul do Brasil. Revista Processando o Saber, v. 13, p. 93-110, 2021.

[69] SINITOX. Sistema Nacional de Informações Tóxico-Farmacológicas. [S. l.]: Fiocruz, 2020. Disponível em: https://sinitox.icict.fiocruz.br/

[70] SOPKO, B. *et al*. Glyphosate interaction with EEF1α1 Indicates altered protein synthesis: Evidence for reduced spermatogenesis and cytostatic effect. **ACS omega**, v. 6, n. 23, p. 14848-14857, 2021.

[71] VIPIEVSKI JÚNIOR, J. M.; VARGAS, L. P.; BET, V. T. Flexibilização dos agrotóxicos no Brasil: a expansão dos registros e do consumo. **Iniciação Científica Cesumar**, 24 (1), 1-22, 2022.

[72] WEYERMÜLLER, A. R.; DEWES, V. V. M. A utilização de agrotóxicos e o impacto ambiental sobre as abelhas. **Revista JurisFIB**, Bauru, v. 16, p. 97-117, 2025.

[73] Zanette, N. M. C. Promoção da saúde para redução da intoxicação medicamentosa: uma estratégia de educação em saúde. UNESC, 2024. Disponível em: http://200.18.15.28/handle/1/11229.

# Capítulo 7

## *Análise comparativa de wetlands construídos para tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras*

*Diogo Bernardo Nascimento*
*Rosinete Batista dos Santos Ribeiro*
*Lílian de Queiroz Firmino*
*Georgiana Maria Vasconcelos Martins*

Resumo: O tratamento de águas residuárias é um dos grandes desafios para o saneamento básico. Neste contexto, os *wetlands* emergem como uma solução sustentável, utilizando processos naturais para remover poluentes com baixo custo de operação e manutenção. Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa de diferentes modalidades de *wetlands* construídos no Brasil, incluindo sistemas de escoamento horizontal, vertical e híbridos. A metodologia inclui revisão bibliográfica e análise de estudos de caso, destacando o desempenho, vantagens e limitações de cada configuração em diferentes contextos climáticos e geográficos. Os resultados mostram que os sistemas verticais apresentam maior eficiência na remoção de nutrientes, enquanto os horizontais se destacam em áreas rurais de baixo custo. Já os sistemas híbridos combinam as vantagens de ambos, sendo altamente eficazes em áreas periurbanas. Conclui-se que a escolha do sistema ideal deve considerar fatores como tipo de efluente, clima e disponibilidade de recursos, propondo diretrizes para otimizar a implementação desses sistemas no Brasil.

Palavras-chave: Sistemas alagados, tratamento de efluentes, escoamento horizontal, escoamento vertical, ecotecnologias.

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento de águas residuárias é um desafio relevante no Brasil em termos de sustentabilidade e saúde pública. Com o crescimento populacional e a expansão urbana, torna-se necessária a adoção de soluções eficientes (Brasil, 2019). Nesse contexto, os wetlands construídos destacam-se como alternativa aos métodos convencionais e vêm ampliando seu uso no país (Sezerino & Pelissari, 2021). Esses sistemas utilizam plantas, substratos e microrganismos para remover poluentes de forma econômica e ambientalmente adequada (Bassani & Decezaro, 2021).

Introduzidos no Brasil na década de 1990, os wetlands construídos vêm sendo adotados em diferentes regiões, sobretudo em áreas rurais e periurbanas (Sezerino & Pelissari, 2021). De baixo custo operacional e de manutenção, tratam diversos efluentes, do esgoto doméstico às águas residuárias industriais (Rodriguez-Dominguez et al., 2020). Entretanto, a diversidade de projetos e as variações ambientais locais geram diferenças de desempenho, evidenciando a necessidade de análises comparativas para subsidiar diretrizes de aplicação (Brasil, 2019).

Além disso, a diversidade climática e geográfica brasileira exige adaptações nesses sistemas. Bassani e Decezaro (2021) destacam a influência do clima tropical úmido e a importância do manejo da vegetação para evitar a colmatação, caracterizada pela redução da porosidade do meio filtrante. Segundo Matos *et al.* (2018), esse processo depende da origem da água residuária, das características do substrato e de fatores operacionais, como carga aplicada, alimentação, configuração do sistema e presença de espécies vegetais.

Em regiões semiáridas, como o Nordeste, o uso de substratos locais e espécies resistentes à seca pode aumentar a eficiência e a resiliência dos wetlands construídos (Funasa, 2009). Além de tratar águas residuárias, esses sistemas contribuem para a conservação hídrica, a redução da poluição e a saúde pública, sendo alternativa sustentável especialmente em comunidades rurais (Brasil, 2019; Vymazal, 2000; Rodriguez-Dominguez *et al.*, 2020).

A aceitação social também é fator essencial para o sucesso dos wetlands, especialmente em áreas rurais e periurbanas, reforçando a necessidade de políticas públicas e capacitação local (Sezerino & Pelissari, 2021). Nesse contexto, este estudo realizou uma análise comparativa das experiências brasileiras com wetlands construídos para o tratamento de águas residuárias, com base em revisão bibliográfica e casos práticos.

O objetivo deste estudo foi comparar experiências brasileiras com wetlands construídos no tratamento de águas residuárias. Foram avaliados sistemas de escoamento vertical e horizontal em áreas urbanas, periurbanas e rurais, considerando tipo de poluente, clima, vegetação e eficiência de remoção. Os resultados visam subsidiar a escolha do sistema mais adequado e ampliar sua aplicação no saneamento ambiental.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. SISTEMAS DE WETLANDS

Os wetlands construídos (WC) são sistemas de engenharia projetados para aproveitar processos naturais, envolvendo vegetação, solo e comunidades microbianas, com o objetivo de tratar águas residuárias de forma eficiente e promover controle ambiental (Vymazal & Kropfelová, 2008), sendo amplamente utilizados no tratamento de diferentes tipos de águas residuárias, com destaque para esgotos domésticos, efluentes industriais e agrícolas.

De acordo com Kadlec e Wallace (2008), os wetlands construídos podem ser classificados, com base no regime hidráulico, em dois grupos principais: os de escoamento superficial e os de escoamento subsuperficial. Este último, por sua vez, subdivide-se conforme a direção do escoamento, podendo ser horizontal ou vertical. Essa classificação é amplamente adotada em estudos sobre o desempenho de wetlands, por influenciar diretamente a eficiência de remoção de poluentes e a dinâmica de transporte hidráulico nos sistemas (EPA, 2000; Von Sperling, 2018).

Esses sistemas representam uma alternativa sustentável e eficiente para o tratamento de águas residuárias. Conforme Kadlec e Wallace (2008) e Von Sperling (2018), podem ser agrupados em três categorias principais: wetlands de escoamento horizontal (WCH), wetlands de escoamento vertical (WCV) e sistemas híbridos (WH), que combinam as duas modalidades anteriores. Essa divisão baseia-se no sentido predominante do escoamento no meio filtrante e relaciona-se ao desempenho hidráulico e à eficiência de remoção de contaminantes (Quadro 1). Cada modalidade possui características, vantagens e limitações específicas, tornando-se adequada a diferentes finalidades e condições operacionais.

**Quadro 1:** Diferenças estruturais e funcionais dos wetlands.

| Aspecto | Horizontal | Vertical | Híbrido |
|---|---|---|---|
| **Fluxo** | Subsuperficial Horizontal | Vertical (de cima para baixo) | Combinação (horizontal + vertical) |
| **Ambiente predominante** | Anaeróbico | Aeróbico | Misto |
| **Eficiência** | Moderada (matéria orgânica e sólidos) | Alta (nutrientes e matéria orgânica) | Muito alta (nutrientes e sólidos) |
| **Manutenção** | Baixa, mas propensa à colmatação | Moderada, exige controle técnico | Moderada a alta, dependendo da escala |
| **Custo inicial** | Baixo | Moderado a alto | Alto |
| **Aplicação ideal** | Comunidades rurais com baixa carga poluente | Efluentes de alta carga Orgânica | Áreas urbanas ou Periurbanas |

Fonte: GESAD (2020).

### 2.1.1. WETLAND CONSTRUÍDO HORIZONTAL (WCH)

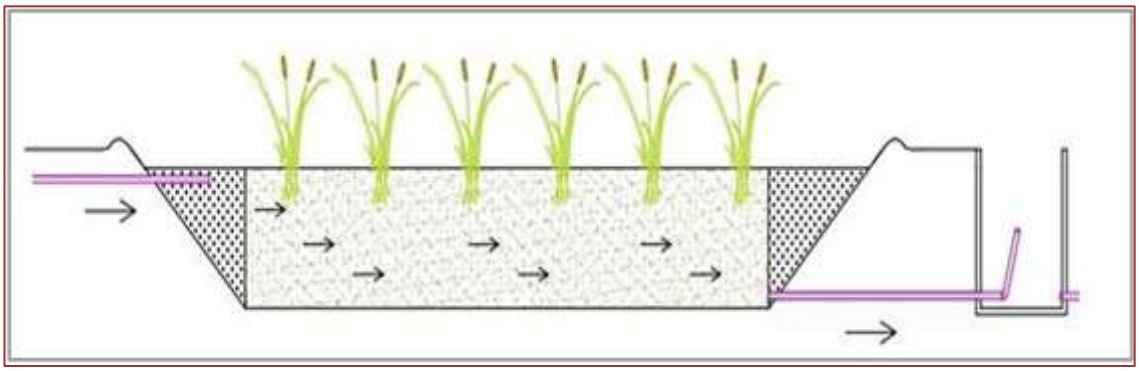
Os wetlands de escoamento horizontal (WCH) são sistemas em que o efluente escoa continuamente, no sentido horizontal, por substrato poroso, como areia, brita ou cascalho. Geralmente incluem macrófitas emergentes, como *Typha* sp. (taboa) e *Phragmites australis* (junco comum), essenciais à funcionalidade do sistema (Vymazal & Kropfelová, 2008).

Seu funcionamento baseia-se em ambiente predominantemente anaeróbico no substrato, com zonas aeróbicas junto às raízes. Segundo Kadlec e Wallace (2008), esse meio favorece processos de filtração física, degradação biológica e absorção de nutrientes por microrganismos e plantas. Como resultado, promove a remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e nutrientes (Von Sperling, 2018).

Entre as principais vantagens dos WCH destacam-se a simplicidade construtiva e o baixo custo de instalação e manutenção. São indicados para tratamento de esgoto doméstico e efluentes com baixa carga de nutrientes (Kadlec & Wallace, 2008). Entretanto, apresentam menor eficiência na remoção de nitrogênio e fósforo, além de propensão à colmatação do substrato pelo acúmulo de sólidos suspensos (Sezerino & Pelissari 2021).

Nesse sistema, o efluente percorre lentamente o material filtrante até a saída, movendo-se horizontalmente pela inclinação do fundo (Figura 1).

**Figura 1:** Esquema representando o WCH.



Fonte: GESAD (2020).

De acordo com Hoffmann *et al.* (2011), a altura de saturação do material filtrante deve corresponder a um terço da altura total do sistema, proporção que evita condições totalmente anaeróbicas e assegura o funcionamento contínuo. O nível de saturação é controlado por tubulação ajustável na saída. Os autores também recomendam material de maior granulometria na entrada, para prevenir a colmatação por acúmulo de sólidos suspensos.

Segundo Sezerino & Pelissari (2021), os wetlands construídos horizontais (WCH) apresentam bom desempenho na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos. No entanto, sua eficiência é limitada nas transformações das frações nitrogenadas e fosforadas.

### 2.1.2. WETLAND CONSTRUÍDO VERTICAL (WCV)

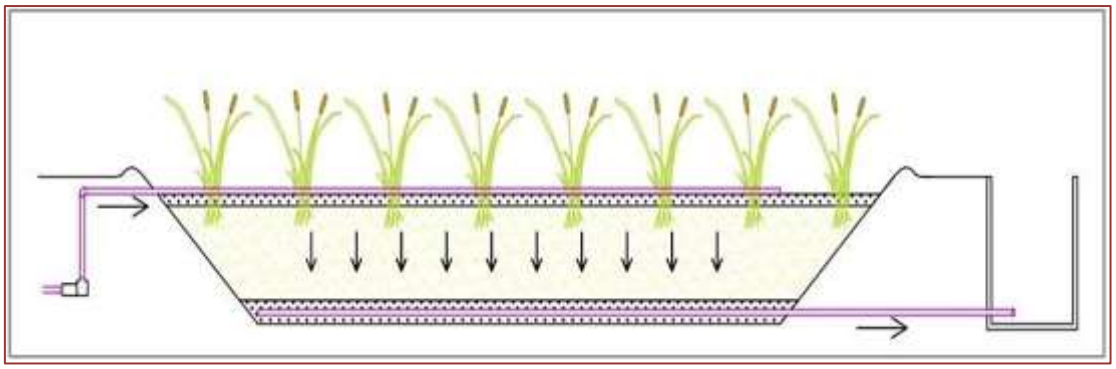
Os wetlands de escoamento vertical (WCV) diferenciam-se pelo fluxo descendente do efluente, aplicado intermitentemente na superfície e percolado por leito de areia e brita. Macrófitas emergentes também são utilizadas, contribuindo para a aeração do substrato e o suporte às comunidades microbianas (Vymazal, 2010).

Segundo Cooper *et al.* (1996) e Kadlec e Wallace (2008), os WCV operam com alimentação intermitente, promovendo ciclos de aeração e ambiente predominantemente aeróbico. Nesses sistemas, predominam processos de filtração, adsorção e degradação biológica aeróbica. Essa configuração favorece alta remoção de nutrientes, especialmente nitrogênio, além de reduzir o risco de colmatação (Gervin & Brix *et al.*, 2001).

Por outro lado, os WCV demandam maior investimento inicial, devido à necessidade de alimentação intermitente, como bombas e temporizadores, além de maior controle técnico e manutenção (Hoffmann *et al.*, 2011). Em contrapartida, apresentam alta eficiência no tratamento de efluentes com elevada carga orgânica, como esgoto doméstico bruto, sendo indicados para etapas iniciais do tratamento. Diferenciam-se, assim, dos sistemas híbridos (WH), geralmente destinados a efluentes previamente clarificados.

Os wetlands construídos verticais apresentam diferentes modalidades, podendo ser de fluxo descendente ou ascendente. Neste estudo, será abordada a modalidade de fluxo descendente (WCVD) (Figura 2).

**Figura 2:** Esquema representando o WCVD.



Fonte: GESAD (2020).

Nos WCVD, o afluente é bombeado intermitentemente para a superfície do sistema, onde percola verticalmente pelo material filtrante até a tubulação de drenagem na base. O funcionamento ocorre em curtos intervalos de alimentação, entre 4 e 12 aplicações diárias, alternados com períodos de repouso equivalentes ao tempo de detenção hidráulica (Hoffmann *et al.*, 2011). A Figura 2 apresenta esquema ilustrativo do sistema.

Devido à operação em condições aeróbias, os WCVD favorecem a nitrificação e apresentam alta eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos (Vymazal, 2010).

Estudos recentes demonstram avanços na aplicação dos wetlands construídos verticais com fundo saturado (WCVD-FS) no tratamento de esgoto sanitário. Segundo Fechine *et al.* (2020), Mazucato *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2022), o ajuste da altura de saturação do material filtrante permite alternar condições aeróbias e anaeróbias na mesma estrutura, otimizando a remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos.

Essa configuração amplia os mecanismos de tratamento, tornando os WCVD-FS alternativa eficiente e versátil, especialmente no saneamento descentralizado. Além disso, Silva et al. (2021) e Pocrywiecki (2023) destacam que o regime hidráulico influencia diretamente o desempenho desses sistemas, reforçando a importância do controle operacional.

### 2.1.3. WETLAND HÍBRIDO (WH)

Os sistemas híbridos (WH) combinam características dos wetlands horizontais (WCH) e verticais (WCV), buscando maior eficiência no tratamento de águas residuárias. Conforme Pelissari *et al.* (2021) e Teixeira *et al.* (2024), podem ser organizados em série ou em paralelo, conforme as necessidades de tratamento.

A configuração mais comum é em série, com tratamento inicial em módulo horizontal, responsável pela remoção de sólidos e matéria orgânica, seguido por módulo vertical, voltado à remoção de nutrientes e compostos recalcitrantes. Essa disposição tem se mostrado eficaz em contextos com elevada carga poluente e restrições operacionais (Mazucato *et al.*, 2020), melhorando a qualidade final do efluente (Vymazal & Kropfelová, 2008).

Os WH apresentam alta eficiência na remoção de matéria orgânica, nutrientes e sólidos suspensos. Sua adaptabilidade a diferentes condições ambientais e cargas poluentes os torna solução versátil. Além disso, a redundância entre módulos confere maior resiliência operacional. No entanto, exigem maior área física, investimento inicial e operação mais complexa (Silveira *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2014).

Os sistemas híbridos combinam diferentes tipos de WC, principalmente WCV e WCH, visando melhor desempenho global. A combinação busca explorar as vantagens de cada sistema em tratamento sequencial. Como os WCH apresentam menor capacidade de nitrificação, torna-se mais efetiva sua associação a um WCV, mais eficiente nesse processo (Vymazal & Kropfelová, 2008). Por outro lado, os WCH oferecem boas condições para desnitrificação devido ao ambiente redutor.

De modo geral, cada tipo de wetland construído apresenta especificidades relacionadas ao efluente e às condições locais. Os wetlands de escoamento horizontal (WCH) oferecem simplicidade construtiva, baixo custo operacional e robustez, mas apresentam limitações na remoção de nutrientes, especialmente nitrogênio (Freitas *et al.*, 2015; Teixeira *et al.*, 2024).

Os wetlands de escoamento vertical (WCV) destacam-se pela maior eficiência em processos aeróbicos, favorecendo a remoção de nitrogênio e matéria orgânica, com menor risco de colmatação, embora exijam maior controle técnico e manutenção (Mazucato *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2022).

Os sistemas híbridos (WH) combinam vantagens dos WCH e WCV, apresentando alta eficiência no tratamento do efluente, porém com maior custo de implantação e operação (Pelissari *et al.*, 2021; Pocrywiecki, 2023).

A escolha do sistema depende da composição do efluente, dos recursos financeiros e espaciais disponíveis e dos requisitos de qualidade final. Estudos como os de Silveira *et al.* (2015) e Vymazal (2010) contribuem para o aprimoramento desses sistemas e reforçam seu potencial sustentável.

## 2.2. MECANISMOS DE FUNCIONAMENTO

Os wetlands construídos são sistemas multifuncionais que promovem a remoção e a transformação de contaminantes por mecanismos físicos, como sedimentação e filtração; químicos, como precipitação e adsorção; e biológicos, como degradação microbiana e absorção pelas plantas. Esses processos ocorrem de forma simultânea ou sequencial durante a passagem do esgoto pelo sistema, reproduzindo, de forma controlada, fenômenos naturais de ambientes úmidos (Pelissari *et al.*, 2021; Teixeira *et al.*, 2024; Sezerino & Pelissari, 2021). Essa característica torna os wetlands soluções sustentáveis e eficazes no tratamento descentralizado de esgotos, mesmo sob elevadas cargas poluidoras.

Conforme ilustrado no Quadro 2, os processos de remoção de poluentes são influenciados, direta ou indiretamente, por fatores como taxas de carga orgânica e inorgânica, tipo de material filtrante, estratégias operacionais, temperatura, presença de macrófitas e condições redox do meio (Bierdeman *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2014).

**Quadro 2:** Processo de remoção de poluentes nos WC.

| Constituintes dosEsgotos | Processos |
|---|---|
| **Matérias Orgânica Solúvel** | Degradação microbiológica aeróbica e anaeróbica. |
| **Sólidos Suspensos** | Filtração: Sedimentação. |
| **Nitrogênio** | Amonificação seguida de Nitrificação e Desnitrificação microbiana; Retirada de planta; Adsorção; Volatização da Amônia. |
| **Fósforo** | Adsorção no material filtrante; Assimilação pelas macrófitas; Precipitação química. |
| **Patógenos** | Filtração; Predação; Absorção. |
| **Metais pesados** | Complexação; Precipítação; Adsorção; Assimilação pelas macrófitas. |

Fonte: Cooper *et al.* (1996).

Os processos que ocorrem nos wetlands construídos resultam da interação entre mecanismos físicos, químicos e biológicos, que contribuem para a remoção de poluentes (Pelissari *et al.*, 2021; Sezerino & Pelissari 2021). Entre os processos físicos, destacam-se a filtração de partículas sólidas e a sedimentação de sólidos suspensos, responsáveis pela remoção inicial de matéria particulada e pela proteção das etapas subsequentes do sistema.

Os processos químicos incluem transformações redox, como nitrificação e desnitrificação, essenciais no ciclo do nitrogênio. Além disso, ocorre a precipitação de fósforo em substratos enriquecidos, contribuindo para a redução de nutrientes no efluente tratado.

No âmbito biológico, destaca-se a degradação da matéria orgânica por microrganismos. As plantas emergentes também exercem papel importante na absorção de nutrientes e nas interações rizosféricas, intensificando os processos ao redor das raízes. A integração desses mecanismos torna os wetlands construídos solução eficiente e sustentável para o tratamento de águas residuárias.

## 2.3. DISTRIBUIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS WETLANDS CONSTRUÍDOS NO BRASIL

No Brasil, os wetlands construídos têm sido implantados em diversas regiões (Figura 3), refletindo adaptação às características locais e aos desafios de cada contexto.

**Figura 3.** Representação espacial do Grupo Wetlands Brasil.

Fonte: GESAD (2020).

No Sudeste, estudos frequentemente abordam wetlands para tratamento de esgoto doméstico em áreas urbanas, com destaque para sistemas híbridos que combinam escoamentos vertical e horizontal, buscando maior eficiência em locais com alta densidade populacional e restrição de espaço (Pelissari *et al.*, 2021; Pocrywiecki, 2023). Em geral, esses estudos visam maximizar a remoção de matéria orgânica e nutrientes, especialmente nitrogênio, utilizando configurações compactas com operação em batelada ou alimentação intermitente.

Entretanto, diferem quanto à configuração dos módulos, às espécies vegetais e aos materiais filtrantes, fatores que influenciam a eficiência do tratamento e a colmatação. Enquanto Pelissari *et al.* (2021) utilizaram esquema horizontal → vertical com areia e brita, Pocrywiecki (2023) avaliou vertical → horizontal com escória granulada e *Typha domingensis*.

No Nordeste, pesquisas têm explorado soluções adaptadas ao clima semiárido, priorizando sistemas com maior retenção hídrica e resistência à evaporação. Sousa *et al.*

(2005) avaliaram wetlands construídos, leitos de brita não vegetados e lagoas de polimento para produção de efluentes destinados ao reuso agrícola. Os resultados indicaram melhor desempenho das lagoas de polimento quanto aos padrões da OMS para irrigação irrestrita.

Na Região Sul, onde o clima é mais frio, estudos avaliam a eficiência dos wetlands em baixas temperaturas. Perondi *et al.* (2020) compararam custos do ciclo de vida de diferentes configurações para tratamento de esgoto doméstico. O sistema composto por tanque séptico, wetland vertical e wetland horizontal apresentou o menor custo, destacando a importância de configurações adaptadas ao clima local.

Esses estudos demonstram que, no Nordeste e no Sul, os wetlands construídos são ajustados às condições climáticas regionais para otimizar o tratamento de esgoto doméstico.

No Centro-Oeste, especialmente em Mato Grosso, os wetlands construídos têm sido considerados alternativa sustentável para tratamento de efluentes, diante da demanda por tecnologias de baixo custo e eficientes. Kuriki *et al.* (2019) destacaram sua eficiência na remoção de poluentes e aplicabilidade em regiões com atividades agropecuárias intensas.

Na Região Norte, os wetlands construídos têm sido aplicados em unidades de conservação e áreas remotas, visando o tratamento de esgoto doméstico com tecnologias de baixo custo e fácil manutenção. Silva (2007) avaliou sistemas de fluxo vertical descendente com solo natural modificado e cultivo de arroz no tratamento de esgotos domésticos primários.

## 2.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS OPERACIONAIS

Os wetlands construídos apresentam vantagens que os tornam atrativos para o tratamento de águas residuárias, sobretudo em contextos com restrição financeira. Segundo Pelissari *et al.* (2021) e Mazucato *et al.* (2020), os sistemas de escoamento horizontal (WCH) destacam-se pelo baixo custo operacional e pela simplicidade de construção e manutenção, sendo viáveis para áreas rurais e comunidades descentralizadas. Por utilizarem materiais locais e exigirem menor controle técnico, são economicamente acessíveis e robustos.

Os sistemas de escoamento vertical (WCV), embora apresentem maior eficiência na remoção de nutrientes, especialmente nitrogênio, demandam maior custo inicial devido à necessidade de equipamentos para alimentação intermitente e maior complexidade operacional (Fechine *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2022). Já os sistemas híbridos (WH) combinam vantagens de ambos os tipos e apresentam maior eficiência global, porém com custos mais elevados de implantação e operação, além de maior exigência técnica (Pocrywiecki, 2023; Teixeira *et al.*, 2024).

Além do aspecto econômico, os wetlands construídos contribuem para a biodiversidade local ao funcionarem como habitats para espécies aquáticas e vegetação adaptada (Pelissari *et al.*, 2021). Também se destacam pela adaptação a diferentes condições climáticas e pela versatilidade no tratamento de águas residuárias domésticas, industriais e agrícolas, ampliando sua aplicabilidade (Sezerino & Pelissari 2021).

Por outro lado, esses sistemas também apresentam desafios operacionais. Os sistemas horizontais, por exemplo, requerem grandes áreas para instalação, o que pode

limitar seu uso em regiões com pouco espaço disponível. Além disso, sua eficiência pode ser reduzida em climas frios ou em períodos de chuvas intensas. Outro desafio é a necessidade de monitoramento constante para evitar obstruções no substrato, que comprometem o desempenho do sistema. Apesar dessas limitações, os wetlands construídos permanecem como alternativa sustentável e promissora para o tratamento de águas residuárias.

Vantagens:

- Custo operacional reduzido e simplicidade de manutenção.
- Contribuição para a biodiversidade e adaptação a diferentes contextos climáticos.
- Capacidade de tratar águas residuárias de múltiplas fontes (domésticas, industriais alimentícios e agrícolas).

Desvantagens:

- Ocupação de grandes áreas em sistemas horizontais.
- Eficiência reduzida em climas frios ou períodos chuvosos intensos.
- Necessidade de monitoramento constante para evitar entupimentos no substrato.

## 2.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS (GESAD, 2020)

### 2.5.1. EFICIÊNCIA DO SISTEMA

A eficiência dos wetlands construídos varia conforme o tipo de sistema e as características do efluente tratado. Em Agronômica (SC), o wetland horizontal apresentou redução de até 85% na Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), demonstrando eficácia no tratamento de esgoto doméstico. Em Meleiro (SC), o sistema vertical alcançou redução de até 90% na DBO, destacando-se na remoção de nutrientes e sólidos (Calheiros *et al.*, 2007). O sistema híbrido de Campos Novos (SC) mostrou desempenho ainda superior, com redução de até 95% na DBO, indicando vantagens na combinação de wetlands horizontais e verticais (Kadlec & Wallace, 2008).

Em regiões com condições climáticas extremas, como o semiárido de Sobral (CE), o sistema horizontal apresentou redução de aproximadamente 75% na DBO, demonstrando adaptação ao clima seco. Contudo, o desempenho foi inferior ao observado em regiões com maior disponibilidade hídrica, como Palhoça (SC), onde o sistema vertical de fundo saturado alcançou redução de até 97% na DBO, evidenciando elevada eficiência no tratamento avançado (Freitas *et al.*, 2015).

### 2.5.2. DESAFIOS OPERACIONAIS

Os desafios operacionais variam conforme o tipo de wetland e as condições locais. Em Agronômica (SC), a colmatação foi problema significativo, causando empoçamento e reduzindo a eficiência do sistema. Esse desafio também foi observado em Parintins (AM), onde o alto teor de matéria orgânica no efluente contribuiu para a colmatação do substrato (Vianna *et al.*, 2008). Em contraste, o sistema vertical de Meleiro (SC) apresentou maior custo inicial, porém maior resiliência operacional a longo prazo.

A manutenção constante foi desafio comum em vários sistemas, especialmente no wetland vertical de fundo saturado de Palhoça (SC), onde a saturação do substrato exigiu intervenções frequentes para manter a eficiência do tratamento (Mendonça *et al.*, 2019). Em Sobral (CE), a adaptação ao clima semiárido exigiu uso de plantas nativas e ajustes no manejo hídrico, destacando a importância de soluções específicas para diferentes contextos ambientais (Silva *et al.*, 2015).

### 2.5.3. IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE

Os wetlands construídos demonstraram impactos ambientais positivos, especialmente quanto à sustentabilidade e à aceitação pelas comunidades locais. Em Agronômica (SC), o sistema operou por 20 anos com baixo custo operacional, favorecendo a aceitação em comunidades rurais. Em Meleiro (SC), o uso de plantas nativas, como *Typha* sp., contribuiu para a sustentabilidade ambiental e a integração ao ecossistema local (Calheiros et al., 2007).

Em Parintins (AM), o sistema mostrou resiliência às condições climáticas tropicais úmidas, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e social em área isolada. Em Palhoça (SC), a geração de efluente tratado de alta qualidade permitiu seu reuso na irrigação, destacando o potencial dos wetlands para a economia circular (Freitas *et al.*, 2015).

## 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de revisão sistemática e análise comparativa, cujo objetivo é avaliar o estado da arte dos *wetlands* construídos no Brasil, no período de 2003 a 2023.

A metodologia adotada busca garantir transparência, reprodutibilidade e rigor científico na seleção, coleta e análise dos dados. A escolha do tema justifica-se pela crescente relevância dos *wetlands* construídos como ecotecnologias sustentáveis para o tratamento de águas residuárias, especialmente em um contexto brasileiro marcado por desafios no saneamento básico e pela necessidade de soluções adaptadas às diferentes realidades regionais.

A pesquisa concentra-se em identificar padrões, eficiências, variáveis influentes e fatores limitantes associados a diferentes modalidades de *wetlands* construídos, considerando sua aplicação em áreas rurais, periurbanas e urbanas. Para tanto, foram priorizadas publicações científicas de alto impacto, relatórios técnicos de instituições reconhecidas e produções acadêmicas, como teses e dissertações, que contribuam para um panorama abrangente e atualizado do tema.

### 3.1. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO TEMPORAL E FONTES DE DADOS

O período analisado compreende os anos de 2003 a 2023, com ênfase nas publicações mais recentes, a fim de garantir a atualidade das informações. As bases de dados consultadas incluem plataformas reconhecidas internacionalmente, como Google Scholar, Scopus, ScienceDirect e Web of Science, além do portal de Periódicos CAPES, que oferece acesso a uma ampla gama de publicações científicas brasileiras.

Como fonte central de referência, foi utilizado o e-book <*Wetlands* Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: Experiências Brasileiras= (E-book-*WETLANDS*-BRASIL), que reúne experiências práticas e estudos de caso relevantes no contexto nacional. Complementarmente, foram consultados relatórios técnicos de instituições como o Ministério do Meio Ambiente e a Fundação Nacional de Saúde (Funasa), bem como teses e dissertações de programas de pós-graduação em áreas afins, como Engenharia Ambiental, Saneamento e Recursos Hídricos.

## 3.2. MÉTODO DE SELEÇÃO DE ARTIGOS E DOCUMENTOS

A seleção dos artigos e documentos seguiu critérios rigorosos para garantir a qualidade e relevância das fontes. Foram priorizadas publicações em revistas com classificação Qualis/CAPES nas categorias A1 a B1, que representam as produções científicas de maior impacto no cenário nacional. Além disso, o foco foi direcionado para estudos realizados no contexto brasileiro, abrangendo diferentes escalas de aplicação, desde áreas rurais até periurbanas e urbanas.

A busca foi conduzida utilizando palavras-chave específicas, como <*wetlands* construídos=, <escoamento vertical=, <tratamento de águas residuárias=, <experiências brasileiras= e <tecnologias de saneamento ambiental=. Esses termos foram combinados de forma estratégica para ampliar a abrangência da pesquisa, ao mesmo tempo em que se manteve a especificidade necessária para o tema.

## 3.3. PROCEDIMENTO DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Após a triagem inicial dos documentos, os estudos selecionados foram analisados com base em quatro aspectos principais:

1. Modalidade de *wetland* descrita: Identificação do tipo de *wetland* construído (e.g., sistemas de escoamento superficial, subsuperficial horizontal ou vertical) e suas características técnicas.
2. Contexto de implementação: Análise do local de aplicação (rural, periurbano ou urbano), tipo de efluente tratado e escala de operação.
3. Eficiência e variáveis influentes: Avaliação dos parâmetros de eficiência do sistema, como remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos, além das variáveis que influenciam o desempenho, como clima, tipo de substrato e espécies vegetais utilizadas.
4. Fatores limitantes e recomendações dos autores: Identificação dos desafios enfrentados na implementação e operação dos *wetlands*, bem como as sugestões propostas para otimização dos sistemas.

A análise dos dados foi realizada de forma sistemática, com a organização das informações em tabelas e quadros comparativos, permitindo a identificação de tendências, lacunas e oportunidades para futuras pesquisas. A síntese dos resultados foi estruturada de modo a fornecer uma visão crítica e integrada sobre o estado atual dos *wetlands* construídos no Brasil, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e para a disseminação de práticas sustentáveis no tratamento de águas residuárias.

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1. ANÁLISE COMPARATIVA DOS CASOS

A análise dos resultados obtidos neste estudo permite compreender os fatores que influenciam a eficiência dos wetlands construídos no Brasil, bem como suas limitações e oportunidades de otimização. A discussão foi estruturada em aspectos identificados na literatura recente, como clima, vegetação, tipo de solo, carga poluidora, lacunas nos estudos existentes e propostas de melhoria.

O clima influencia diretamente o desempenho dos sistemas, especialmente no semiárido nordestino e em áreas tropicais úmidas. Silva *et al.* (2024) e Sá e Pinheiro (2025) evidenciam que sazonalidade, evaporação e disponibilidade hídrica afetam o tratamento e a sustentabilidade operacional. A vegetação também é essencial na remoção de poluentes e na estabilidade ecológica, embora o manejo inadequado possa favorecer espécies invasoras (Korb *et al.*, 2024; Teixeira *et al.*, 2024).

O tipo de solo e o material do leito filtrante mostraram-se determinantes para o desempenho hidráulico e o controle da colmatação, comum em wetlands horizontais sob cargas elevadas. A carga poluidora e as características do efluente também influenciam a escolha do sistema, conforme Teixeira *et al.* (2024) e os estudos da Tabela Comparativa.

Entre as principais limitações dos estudos existentes destacam-se a falta de padronização metodológica, o reduzido número de parâmetros avaliados, com foco excessivo na remoção de DBO, e a escassez de dados de longo prazo. Essas lacunas reforçam a necessidade de pesquisas interdisciplinares e continuadas no contexto brasileiro (Teixeira *et al*., 2024; Cardoso e Poleto, 2024).

Quanto às propostas de melhoria, destacam-se a adaptação dos sistemas às condições climáticas locais, o uso de substratos alternativos com maior durabilidade e eficiência e a integração de tecnologias complementares, como sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS), conforme sugerido por Cardoso e Poleto (2024). Tais estratégias são fundamentais para ampliar a eficiência, a viabilidade e a replicabilidade dos wetlands em diferentes contextos regionais.

Com o objetivo de aprofundar essa compreensão, foi elaborado o Quadro 3, com base em estudos de caso reais de diferentes regiões do Brasil, cada uma com particularidades climáticas, geográficas e socioeconômicas. A análise permite avaliar desempenhos, desafios operacionais, custos e impactos ambientais e sociais desses sistemas, servindo como subsídio técnico e científico para futuras aplicações.

**Quadro 3:** Tabela comparativa entre *wetlands* construídos no Brasil.

| Estudo de Caso | Tipo de Wetland | Autores Referenciados | Características do Efluente | Eficiência do Sistema | Desafios e Sustentabilidade |
|---|---|---|---|---|---|
| **Agronômica (SC)** | Horizontal | Calheiros et al. (2007); Kadlec & Wallace (2008); Sezerino Pelissari & (2021) | Esgoto doméstico | DBO: até 85% | Colmatação e plantas invasoras; sistema resiliente |
| **Meleiro (SC)** | Vertical | Calheiros et al. (2007); Hoffmann et al. (2011); Sezerino & Pelissari (2021) | Esgoto sanitário de pequena comunidade | DBO: até 90%; Nitrogênio: 70% | Custo inicial elevado; manutenção das bombas |
| **Campos Novos (SC)** | Híbrido (WCH + WCV) | Pelissari et al. (2021); Mazucato et al. (2020); Pocrywiecki (2023) | Esgoto doméstico em loteamentos | DBO: até 95%; Nitrogênio: ~80% | Necessidade de manutenção integrada entre módulos |
| **Sobral (CE)** | Horizontal | Silva et al. (2015); Funasa (2009); Oliveira et al. (2021) | Água residuária de refeitórios e banheiros | DBO: ~75% | Adaptação ao clima semiárido; uso de plantas nativas |
| **Palhoça (SC)** | Vertical de Fundo Saturado | Fechine et al. (2020); Santos et al. (2022); Silva et al. (2021) | Esgoto sanitário em condomínios | DBO: até 97%; Nitrogênio: >85% | Manutenção constante; possibilidade de reúso |
| **Parintins (AM)** | Horizontal | Vianna et al. (2008); Silva (2007); Sezerino & Pelissari (2021) | Esgoto doméstico e cinza | DBO: ~80%; Fósforo: ~60% | Colmatação por alta carga orgânica; resiliência em área isolada |

Fonte: Autores (2025).

O Quadro 3 apresenta uma síntese das principais informações de seis localidades distribuídas entre as regiões sul, nordeste e norte do país. Para cada caso, são indicados o tipo de sistema adotado (horizontal, vertical ou híbrido), o efluente tratado, a eficiência na remoção de poluentes, as dificuldades operacionais e os efeitos positivos relacionados à sustentabilidade ambiental e à aceitação social.

Essa sistematização serviu de base para a análise comparativa desenvolvida nas seções seguintes, permitindo identificar padrões de desempenho, vantagens e limitações de cada configuração, além de subsidiar a proposição de soluções técnicas mais adequadas a cada realidade.

Com base no Quadro 3, foi possível identificar comportamentos distintos entre os diferentes tipos de wetlands construídos implantados em diversas regiões do brasil. A análise considerou aspectos como eficiência de tratamento, contexto climático, custos de implantação e operação, além dos impactos sociais e ambientais associados a cada solução.

Os sistemas horizontais, como os implantados em agronômica (SC), Sobral (CE) e Parintins (AM), destacam-se pela simplicidade operacional e pelos menores custos de

implantação. Contudo, apresentam limitações na remoção de nutrientes, com melhor desempenho na redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e na retenção de sólidos.

Em agronômica (SC), apesar de registros de colmatação do meio filtrante e proliferação de plantas invasoras, o sistema permanece em operação há mais de 20 anos, demonstrando viabilidade técnica e operacional em contexto rural. Em Sobral (CE), o sistema mostrou adaptação às condições do semiárido, mesmo diante da escassez hídrica, configurando alternativa viável para comunidades isoladas. Em Parintins (AM), embora o elevado teor de matéria orgânica tenha favorecido a colmatação, o sistema apresentou boa integração com a vegetação local e adaptabilidade ao clima tropical úmido.

Em relação aos sistemas verticais, como os adotados em meleiro (SC) e palhoça (SC), verificou-se maior eficiência na remoção de nutrientes, especialmente nitrogênio. Esse desempenho está associado à alimentação intermitente, que favorece condições aeróbicas no leito filtrante e otimiza os processos biológicos de degradação.

Em meleiro (SC), os dados indicam redução de até 90% da DBO e cerca de 70% do nitrogênio, com uso de espécies vegetais nativas. Em Palhoça (SC), os índices foram ainda superiores, ultrapassando 97% de remoção de DBO e 85% de nitrogênio, evidenciando tratamento avançado com potencial de reúso do efluente. Por outro lado, esses sistemas exigem maior investimento inicial e manutenção constante, sobretudo para evitar saturação do substrato e falhas nas bombas de alimentação.

O sistema híbrido implantado em campos novos (SC) apresentou desempenho equilibrado entre eficiência e sustentabilidade. A combinação das configurações horizontal e vertical permitiu alcançar até 95% de remoção de DBO e aproximadamente 80% de remoção de nitrogênio, demonstrando boa adaptação a áreas com maior densidade populacional. Contudo, esse modelo requer gestão integrada da manutenção entre os módulos, o que pode representar desafio técnico em contextos com menor capacitação local.

## 4.2. EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO DE DIFERENTES TIPOS DE EFLUENTES

De forma geral, os sistemas de escoamento vertical demonstraram maior eficiência no tratamento de efluentes com elevada carga de nutrientes, como observado nos estudos realizados em meleiro e palhoça (Fechine *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2022). Essa superioridade relaciona-se à maior presença de oxigênio no meio filtrante, favorecida pela alimentação intermitente, que intensifica processos aeróbicos, como a nitrificação.

Por outro lado, os sistemas de escoamento horizontal, embora apresentem desempenho mais limitado na remoção de nutrientes, mostraram-se eficazes na redução de matéria orgânica e sólidos suspensos. Por isso, são especialmente indicados para o tratamento de esgotos domésticos de baixa complexidade, como evidenciado nos casos de agronômica e sobral (Sezerino & Pelissari 2021; Oliveira *et al.*, 2021).

## 4.3. DESEMPENHOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E GEOGRÁFICAS

A distribuição geográfica dos estudos de caso analisados evidencia que os wetlands construídos podem ser adaptados a diferentes contextos climáticos, desde regiões úmidas da região sul até o semiárido nordestino e áreas tropicais da região norte. Essa versatilidade é confirmada por Teixeira *et al.* (2024), que destacam a ampla aplicabilidade

desses sistemas em diferentes biomas e condições socioambientais. Estudos de Silva *et al.* (2024) e Oliveira *et al.* (2021) também reforçam essa adaptabilidade ao apresentarem soluções específicas para o clima seco da Chapada do Araripe e do semiárido nordestino.

No semiárido, como em sobral (CE), mesmo com a escassez hídrica, o sistema operou de forma estável, demonstrando capacidade de adaptação. Em ambientes úmidos, como Parintins (AM), a vegetação nativa teve papel importante na integração do sistema ao ambiente e em sua resiliência operacional. Assim, quando adequadamente planejados, esses sistemas podem atender desde regiões secas até áreas tropicais com elevados índices de precipitação.

## 4.4. CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E MANUTENÇÃO

Um ponto importante observado na análise dos estudos foi a diferença de custos entre os tipos de sistemas. Os wetlands de escoamento horizontal (WCH) mostraram-se mais econômicos na instalação e na operação, sendo indicados para comunidades rurais e contextos de baixo orçamento, conforme discutido por Assis *et al.* (2024). A simplicidade construtiva, o uso de materiais locais e a baixa demanda de manutenção tornam esses sistemas acessíveis e sustentáveis a longo prazo.

Por outro lado, os sistemas de escoamento vertical (WCV), embora apresentem custos iniciais mais elevados e maior exigência técnica, oferecem desempenho superior no tratamento, especialmente na remoção de nutrientes. Além disso, possibilitam o reúso do efluente tratado e menor impacto ambiental ao longo do tempo. Teixeira (2024) destaca que os WCV são adequados para aplicações mais exigentes, como o tratamento terciário em residências unifamiliares, nas quais se busca elevado padrão de qualidade do efluente final.

Dessa forma, a escolha entre os sistemas deve considerar o equilíbrio entre os recursos disponíveis, a complexidade do efluente e os objetivos específicos de cada projeto de saneamento.

## 4.5. IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS OBSERVADOS

Todos os sistemas analisados apresentaram contribuições ambientais positivas, com destaque para a redução da carga poluidora nos corpos hídricos receptores, como apontado por Teixeira *et al.* (2024) e Pelissari *et al.* (2021). Além disso, a aceitação social foi elevada, sobretudo quando os sistemas utilizaram vegetação nativa e foram adaptados à realidade local, favorecendo integração paisagística e valorização comunitária (Assis *et al.*, 2024; Fechine *et al.*, 2020).

Entre os casos analisados, o sistema híbrido implantado em campos novos (SC) destacou-se por aliar alta eficiência na remoção de poluentes, sustentabilidade ambiental e boa adaptação ao contexto urbano. A integração entre wetlands horizontais e verticais permitiu resultados expressivos em áreas densamente ocupadas, conforme discutido por Pocrywiecki (2023) e Mazucato *et al.* (2020). Essa combinação mostrou-se alternativa promissora para regiões mais complexas e populosas, onde há demanda por elevado desempenho e limitações de espaço e infraestrutura tradicional.

## 4.6. COMPARAÇÃO COM CASOS INTERNACIONAIS

A comparação com experiências internacionais reforça a viabilidade dos wetlands construídos no brasil. Na Alemanha, sistemas híbridos têm sido amplamente utilizados, combinando escoamento vertical e horizontal para aumentar a eficiência na remoção de nutrientes (Kadlec & Wallace, 2008). Essa abordagem pode ser adaptada ao brasil, especialmente em regiões com alta variabilidade climática, como campos novos (SC).

Nos estados unidos, a integração de wetlands com biorreatores para o tratamento de micropoluentes tem sido prática recorrente, representando alternativa promissora para efluentes industriais no brasil (Silva *et al.*, 2015). Essas experiências destacam a importância de investir em pesquisa e desenvolvimento para adaptar tecnologias avançadas ao contexto brasileiro.

## 4.7. RECOMENDAÇÕES DE WETLANDS – REGIÕES BRASILEIRAS

A Figura 4 apresenta a distribuição dos tipos de wetlands recomendados para as cinco regiões brasileiras, destacando as características que justificam essas escolhas, discutidas a seguir.

**Figura 4.** Regiões brasileiras 3 Tipos recomendados de *Wetlands*.

Fonte: Autores (2025).

No norte do brasil, onde predomina clima úmido e quente com altos índices pluviométricos, os wetlands de escoamento horizontal (WCH) mostraram-se opção adequada. Esse sistema adapta-se bem a regiões com grande volume de chuvas, permitindo distribuição uniforme da água e eficiente remoção de poluentes, além de implantação mais simples em áreas com maior disponibilidade hídrica (Silva, 2007; Sezerino & Pelissari 2021).

No Nordeste, caracterizado por clima semiárido e escassez hídrica, os wetlands de escoamento vertical (WCV) foram considerados mais adequados. Esses sistemas apresentam maior eficiência no uso da água e no tratamento do efluente, sendo indicados para regiões com disponibilidade hídrica limitada. A capacidade de operar com menor volume de água e remover nutrientes e poluentes reforça sua viabilidade no semiárido nordestino (Oliveira *et al*., 2021; Silva *et al*., 2021; Sá e Pinheiro, 2025).

No Centro-oeste, onde predomina a agricultura intensiva, os wetlands híbridos foram recomendados. Esse sistema combina vantagens dos wetlands horizontais e verticais, oferecendo flexibilidade e eficiência no tratamento de efluentes agrícolas com alta carga poluidora. Kuriki *et al.* (2019) destacam sua aplicabilidade em áreas agropecuárias intensivas.

No Sudeste, região de alta densidade urbana e elevada geração de efluentes domésticos e industriais, a combinação de wetlands verticais e híbridos mostrou-se mais adequada. Esses sistemas apresentam elevada eficiência em áreas urbanas com espaço limitado e alta demanda por tratamento. Estudos de Abreu (2019) e Teixeira (2024) demonstram bons resultados em sistemas compactos.

No Sul do Brasil, onde o clima é mais frio e sujeito a invernos rigorosos, os wetlands híbridos também foram indicados. A combinação de diferentes técnicas de tratamento permite operação estável e eficiente mesmo em temperaturas mais baixas. Perondi *et al.* (2020) e Pelissari *et al.* (2021) reforçam o desempenho consistente desses sistemas em condições térmicas adversas.

Em síntese, a escolha do tipo de wetland mais adequado para cada região brasileira deve considerar características climáticas, hídricas e socioeconômicas locais. A Figura 4 resume as recomendações técnicas regionais para aplicação desses sistemas.

## 5. CONCLUSÃO

Com base na análise realizada, constatou-se que os wetlands construídos são alternativas eficientes e adaptáveis para o tratamento de efluentes em diferentes contextos geográficos e climáticos do Brasil. Os sistemas verticais, horizontais e híbridos apresentaram desempenhos distintos, com vantagens e limitações relacionadas às condições locais e ao tipo de efluente tratado.

Os wetlands verticais destacaram-se pela elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e nutrientes, sendo indicados para efluentes com maior carga poluidora. Os horizontais mostraram menor custo e simplicidade operacional, sendo adequados para áreas rurais e sistemas descentralizados, embora com limitações na remoção de nutrientes. Já os sistemas híbridos combinaram vantagens de ambos, apresentando elevado desempenho e maior versatilidade operacional.

Os resultados evidenciam que a escolha do sistema mais adequado deve considerar fatores como clima, características do efluente, disponibilidade de área e recursos financeiros. A adaptação às condições regionais é fundamental para maximizar a eficiência e garantir a sustentabilidade do tratamento.

Dessa forma, os wetlands construídos consolidam-se como solução viável e sustentável para o saneamento, especialmente em áreas rurais, periurbanas e comunidades isoladas, onde sistemas convencionais muitas vezes são inviáveis. Além dos

benefícios ambientais, contribuem para a saúde pública, a conservação dos recursos hídricos e a ampliação do acesso ao tratamento de efluentes no país.

## REFERÊNCIAS

[1] ABREU, F. S. de. Aplicação de *wetlands* construídos em áreas urbanas: estudo de caso no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 285-295, 2019.

[2] ASSIS, R. P. de et al. Ecotecnologias aplicadas ao saneamento rural: experiências em escritórios pedagógicos. **Boletim Técnico do Saneamento Rural**, v. 14, n. 1, p. 77-89, 2024.

[3] BASSANI, L.; DECEZARO, S. T. Hidrodinâmica e mecanismos de transferência e consumo de oxigênio em *wetlants* construídos verticais. In: SEZERINO, P. H.; PELISSARI, C. (org.). *Wetlands* construídos como ecotecnologia para o tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras. Curitiba: Brazil Publishing, 2021. cap. 3, p. 47-66.

[4] BIERDEMAN, R. et al. Mechanisms of pollutant removal in constructed *wetlands*. **Journal of Environmental Quality**, v. 31, n. 3, p. 8483856, 2002.

[5] BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Programa Nacional de Saneamento Rural. Brasília: Funasa, 2019.

[6] CALHEIROS, C. S. C.; CASTRO, P. M. L.; RANGEL, A. O. Constructed *wetland* systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. **Water Research**, v. 41, n. 8, p. 179031798, 2007.

[7] CARDOSO, C. M.; POLETO, C. Aplicação de soluções baseadas na natureza para drenagem urbana sustentável. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 983115, 2024.

[8] COOPER, P. et al. Design of a vertical-flow constructed *wetland* system to treat septic tank effluent in the United Kingdom. **Water Science and Technology**, v. 34, n. 3-4, p. 3553362, 1996.

[9] EPA. United States Environmental Protection Agency. Manual: Constructed *Wetlands* Treatment of Municipal Wastewaters. Washington, D.C., 2000.

[10] FECHINE, G. J. M. et al. Avaliação de desempenho de sistemas de *wetland* vertical com fundo saturado para o tratamento de esgoto doméstico. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, n. 1,p. 45356, 2020.

[11] FREITAS, T. K. C. S. et al. Performance of constructed *wetlands* in the treatment of domestic wastewater: case study in southern Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 150, p. 4473 454, 2015.

[12] FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Manual de Sistemas de Tratamento de Águas Residuárias. Brasília: Funasa, 2009.

[13] GERVIN, L.; BRIX, Hans. Removal of nutrients from combined sewer overflows and lake water in a vertical-flow constructed wetland system. **Water science and technology**, v. 44, n. 11-12, p. 171-176, 2001.

[14] GESAD. Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado. Sistemas de *wetlands* construídos. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

[15] HOFFMANN, H. et al. Constructed *wetlands* for grey water treatment. Ecological Engineering, v. 37, n. 1, p. 70379, 2011.

[16] KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. Treatment *wetlands*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

[17] KIM, J. O. et al. Hybrid constructed *wetlands* for wastewater treatment and reuse. Ecological Engineering, v. 67, p. 138, 2014.

[18] KORB, R. M. et al. Potencial de espécies nativas para uso em *wetlands* construídos: uma análise em regiões tropicais. **Revista Brasileira de Ecotecnologia**, v. 6, n. 1, p. 22334, 2024.

[19] KURIKI, M. S. et al. Potencial de utilização de *wetlands* construídos no estado de Mato Grosso: uma revisão. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 1, p. 35345, 2019.

[20] MAZUCATO, R. et al. *Wetlands* construídos de fundo saturado no tratamento de esgoto doméstico: desempenho e implicações operacionais. Revista Ambiente & Água, v. 15, n. 2, p. 2343248, 2020.

[21] MENDONÇA, R. et al. Alternative substrates for constructed *wetlands*: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 4753483, 2019.

[22] MATOS, Mateus Pimentel de et al. Colmatação e desempenho de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial ao longo de oito anos de operação. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 06, p. 1227-1237, 2018.

[23] OLIVEIRA, M. C.; SILVA, R. C.; TANNUS, L. M. B. Avaliação de *wetlands* horizontais no tratamento de resíduos de suinocultura. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 4103418, 2021.

[24] PERONDI, T. A. et al. Avaliação do custo do ciclo de vida de *wetlands* construídos no tratamento de esgoto doméstico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 2253234, 2020.

[25] POCRYWIECKI, E. L. Eficiência de *wetlands* verticais e híbridos na remoção de nutrientes: análise em sistemas descentralizados. **Revista de Engenharia Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 13327, 2023.

[26] RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, M. A. et al. Constructed *wetlands* in Latin America and the Caribbean: A review of experiences during the last decade. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1744, 2020.

[27] SANTOS, R. B. et al. *Wetlands* de fundo saturado: desafios operacionais em áreas urbanas. **Revista Brasileira de Ecotecnologia**, v. 4, n. 1, p. 993112, 2022.

[28] SILVA, C. J. et al. Performance of constructed *wetlands* in the treatment of domestic wastewater in a semiarid region of Brazil. **Ecological Engineering**, v. 84, p. 4433452, 2015.

[29] SILVA, E. A. *Wetlands* construídos no tratamento de esgotos em áreas remotas: estudo de caso no Amazonas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2007.

[30] SILVA, R. M. et al. Avaliação de desempenho de diferentes configurações de *wetlands* construídos para esgoto sanitário. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 29, n. 1, p. 33342, 2021.

[31] SILVA, R. P. et al. Ecotecnologias aplicadas ao tratamento de águas residuárias: desafios no semiárido nordestino. **Revista Tecnologia & Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 1013115, 2024.

[32] SOUSA, J. T. et al. Tratamento de esgoto anaeróbio para reuso agrícola no semiárido. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 1253132, 2005.

[33] TEIXEIRA, D. B. Sistemas de tratamento de águas residuárias em escala domiciliar: desempenho de *wetlands* construídos compactos. **Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente**, v. 20, n. 1, p. 13325, 2024.

[34] TEIXEIRA, D. B. et al. *Wetlands* construídos e saneamento descentralizado: análise bibliométrica da produção científica brasileira. **Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 13, n. 2, p. 59374, 2024.

[35] VIANNA, L. N. et al. Constructed *wetlands* for wastewater treatment in Brazil: a review. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 3, p. 4313440, 2008.

[36] VON SPERLING, M. Dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil. Boletim *Wetlands* Brasil, ed. especial, p. 1365, dez. 2018. ISSN 2359-0548.

[37] VYMAZAL, J. Constructed *wetlands* for wastewater treatment. **Water**, v. 2, n. 3, p. 5303549, 2010.

[38] VYMAZAL, J.; KROPFELOVÁ, L. Wastewater treatment in constructed *wetlands* with horizontal sub-surface flow. Dordrecht: Springer, 2008.

[39] WU, S. et al. The role of vegetation in constructed *wetlands* for pollutant removal. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 13, p. 132031360, 2014.

# Capítulo 8

## Eletrosíntese da liga Ni-Mn para produção de hidrogênio via eletrólise: uma revisão sistemática da literatura (2015–2025)

*Ivna Ellen de Lucena Paulino Bandeira*
*Josiane Dantas Costa*
*Larissa Gomes de Farias*
*Ana Regina Nascimento Campos*
*Renato Alexandre Costa de Santana*

Resumo: A crescente demanda por tecnologias sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de materiais eletrocatalíticos eficientes para a produção de hidrogênio via eletrólise da água. Nesse contexto, ligas Ni–Mn obtidas por eletrodeposição têm se destacado como alternativas promissoras devido ao seu baixo custo, abundância e propriedades eletroquímicas ajustáveis. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre a eletrossíntese de ligas Ni–Mn, com ênfase nos parâmetros de deposição, composição dos banhos eletrolíticos e aplicações, no período de 2015 a 2025. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science, resultando inicialmente em 374 registros. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, bem como as etapas de triagem e elegibilidade conforme as diretrizes do protocolo PRISMA, foram selecionados 13 artigos para análise crítica. Os resultados indicam que a eletrodeposição de ligas Ni–Mn é fortemente influenciada por variáveis como pH, temperatura, densidade de corrente e presença de agentes complexantes. Sistemas eletrolíticos aquosos à base de sulfatos e cloretos, associados a complexantes como citratos, são empregados para viabilizar a codeposição dos metais. Observa-se a predominância de meios ácidos (pH entre 1,0 e 5,0) e temperaturas moderadas, condições que favorecem a estabilidade do banho e a qualidade dos depósitos. Além disso, verifica-se uma evolução no foco das pesquisas, que passaram de estudos voltados às propriedades magnéticas e anticorrosivas para aplicações em eletrocatálise.

Palavras-chave: Metais de transição, eletrodeposição, HER.

## 1. INTRODUÇÃO

Materiais avançados de engenharia demandam um rápido desenvolvimento, influenciados pela crescente especialização de materiais que são aplicados a tarefas específicas. Nas últimas décadas uma classe de materiais, conhecida por ligas metálicas, tem sido extensivamente estudada, especificamente, as ligas nanocristalinas com propriedades magnéticas que garantem desempenho funcional a esses materiais. A Liga de Ni-Mn é exemplo desses materiais e se destaca por sua alta resistência à corrosão e capacidade de formar filmes finos, o que a torna uma opção atraente para várias aplicações, incluindo microssistemas e eletroquímica (Kelly; Goods; Yang, 2003; Goods; Kelly; Yang, 2004; Lee; Cheng; Wu, 2015).

Ligas metálicas com propriedades magnéticas são geralmente preparadas por métodos tradicionais como a pulverização catódica (Chiu *et al.*, 2018), spray térmico (Zhou *et al.*, 2009), pulverização de plasma (Kumar *et al.*, 2020) e deposição de laser pulsado (Ong *et al.*, 2008). No entanto, todas essas técnicas exigem um controle de processo de alta precisão, tornando a produção em massa cara. Nesse contexto surge um método de produção física viável, conhecido como eletrodeposição, que permite a obtenção de materiais magnéticos com alta eficácia e baixo custo (Nicolenco *et al.*, 2021). Através da eletrodeposição é possível controlar a composição e espessura do revestimento e ainda utilizar substratos com diferentes dimensionamentos geométricos. E por esses motivos, esta técnica tornou-se atraente e vem sendo escolhida por diversos pesquisadores para produzir ligas magnéticas (Chen; Yang; Fu, 2020; Matsui; Omura, 2020; Figueira; Rovere; Gargarella, 2021; Zhou *et al.*, 2022).

Porém o sucesso da obtenção de revestimentos por eletrodeposição depende dos parâmetros do banho (pH e composição do banho eletrolítico) e dos parâmetros operacionais (densidade de corrente aplicada, temperatura e agitação mecânica (Oliveira *et al.*, 2021). No desenvolvimento das ligas Ni-Mn a maioria dos estudos investiga o efeito de parâmetros operacionais seguindo uma metodologia experimental tradicional, ou seja, com métodos univariados (Ananth, 1998; Kirthika; Thangaraj, 2021).

Embora a eletrodeposição da liga Ni-Mn já tenha sido amplamente estudada, a maioria das investigações se concentrou na relação entre a morfologia da superfície e as propriedades magnéticas. Trabalhos de pesquisa que investiguem a influência de compostos aditivos ao banho eletrolítico, pH, densidade de corrente, temperatura, agitação mecânica e tipo de substrato nas propriedades mecânicas e na resistência a corrosão ainda são escassos. Cabe ressaltar que a eletrodeposição de ligas é um processo complexo onde vários fatores sintonizam a taxa de nucleação e o crescimento do depósito (Asseli *et al.*, 2019), destacando a importância de investigação da influência desses fatores.

Desta forma, apesar do avanço significativo nessa área, os resultados são ainda dispersos, e faltam estudos sistemáticos que consolidem o conhecimento sobre o desempenho, composição e condições de síntese desses materiais. Assim, uma revisão sistemática se faz necessária para mapear os parâmetros de eletrodeposição adotados, os meios eletrolíticos empregados e os indicadores de desempenho eletrocatalítico utilizados.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. ELETRODEPOSIÇÃO

A partir de sua descoberta no final do século XIX, a eletroquímica tem desempenhado um papel crucial em diversos processos industriais. Em especial, a técnica da eletrodeposição tem se destacado como um método químico acessível e flexível para a síntese de revestimentos, sendo amplamente empregada ao longo das décadas na fabricação de camadas protetoras de superfícies de metálicas (Ruiz-Gómez; Fernández-González; Perez, 2022).

Eletrodeposição é uma técnica de fabricação que tem como princípio a redução de íons presentes em meio aquoso, orgânico ou sal fundido na superfície de um cátodo por meio de uma corrente elétrica controlada por uma fonte externa. Esse processo permite a obtenção de filmes finos com propriedades catalíticas e magnéticas, resistência à corrosão e ductilidade, dependendo da composição (Gentil, 2022; Liu *et al.*, 2020). Trata-se de uma técnica de fabricação que oferece a possibilidade de controlar diversos parâmetros experimentais, como a composição da solução eletrolítica, temperatura de deposição, densidade de corrente aplicada, carga a ser depositada e pH da solução, favorecendo assim o estudo das características físicas e químicas dos eletrodepósitos (Vayenas; White; Gamboa-Aldeco, 2008).

Esses parâmetros exercem influência no processo de eletrodeposição e são classificados como variáveis do banho eletrolítico e variáveis operacionais. As variáveis do banho são representadas pelo pH e composição química do banho eletrolítico. Enquanto as variáveis operacionais englobam a temperatura do sistema, a densidade de corrente, agitação mecânica do banho e as relações geométricas dos eletrodos (Aliofkhazraei *et al.,* 2021; Santana, 2007). O controle dessas variáveis determina a qualidade dos revestimentos e permite que altos níveis de ajuste da composição química, das propriedades mecânicas e magnéticas sejam alcançados (Correia; MacHado, 2000; Ergeneman *et al.*, 2011; Sharma *et al.*, 2017).

### 2.2. LIGAS DE Ni-Mn

Os primeiros artigos publicados sobre as ligas Ni-Mn remontam ao início do século XX, quando pesquisadores começaram a investigar as propriedades magnéticas dessas ligas (Jaffee, 1948; Kaya; Kussmann, 1931). Em meados de 1950, os estudos foram direcionados a investigação das propriedades estruturais e físicas da liga Ni-Mn, descobrindo que ela possuía propriedades interessantes, como alta resistência à corrosão, propriedades magnéticas únicas e alta condutividade elétrica (Bozorth, 1950; Landau; Oldach, 1942; Sato, 1951). Estas propriedades levaram ao desenvolvimento de novas aplicações para a liga Ni-Mn, como na produção de contatos elétricos e microsistemas (Kelly; Goods; Yang, 2003; Yamashita; Asano; Wakoh, 1972).

Desde então, a liga Ni-Mn tem sido continuamente estudada e aprimorada, com pesquisadores buscando otimizar suas propriedades para diferentes aplicações. Hoje, essa liga é um material versátil e amplamente utilizado em várias aplicações industriais como em dispositivos eletrocrômicos (Monica *et al.*, 2022), baterias (Lin; Zhang, 2023) e atuadores (Cheng *et al.*, 2021).

Há várias razões pelas quais a investigação sobre o sistema Ni-Mn é interessante. Uma delas é que o níquel e o manganês apresentam tipos contrários de alinhamento

magnético em seus estados básicos e a junção de níquel ferromagnético e manganês paramagnético leva a propriedades magnéticas surpreendentes (Rajeswari *et al*., 2014). Sendo assim vários métodos de fabricação foram utilizados para obtenção dessas ligas, sendo os principais a fusão (Bachagha *et al.*, 2022), a sinterização (Maziarz *et al.*, 2019) e a deposição, como eletrodeposição e deposição física de vapor (PVD).

Entre esses métodos, a eletrodeposição é amplamente utilizada na obtenção das ligas de Ni-Mn. Nesse processo, a liga é formada por meio da deposição de íons metálicos em um substrato sob a ação de corrente elétrica. Primeiramente, uma solução eletrolítica contendo íons metálicos de Ni e Mn é preparada e o substrato é imerso nessa solução. Em seguida, uma corrente elétrica é aplicada ao substrato, promovendo a redução dos íons metálicos na sua superfície, resultando na formação da liga Ni-Mn (Ruiz-Gómez; Fernández-González; Perez, 2022). Uma das principais aplicações desses revestimentos obtidos por eletrodeposição é nos sistemas microeletromecânicos (Goods; Kelly; Yang, 2004)

Diversos fatores influenciam as propriedades da liga Ni-Mn obtida por eletrodeposição, tais como a composição da solução eletrolítica, a densidade de corrente elétrica aplicada, bem como a temperatura e pH da solução. Além disso, aditivos podem ser adicionados à solução eletrolítica visando melhorar as propriedades dos revestimentos obtidos, como por exemplo, a resistência a corrosão, dureza e desempenho magnético.

Para fazer um levantamento sobre os parâmetros utilizados na obtenção dessas ligas por eletrodeposição se faz necessária uma revisão sistemática da literatura.

## 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão sistemática da literatura, estruturada de acordo com as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que estabelece critérios padronizados para garantir transparência, rigor metodológico e reprodutibilidade na condução e no relato de revisões sistemáticas e meta-análises.

A busca bibliográfica foi realizada de forma sistemática nas bases de dados Scopus e Web of Science. Os termos de busca foram definidos a partir das palavras-chave centrais do tema e de seus respectivos sinônimos, combinados por meio de operadores booleanos (AND e OR), com o objetivo de ampliar a abrangência da busca e, simultaneamente, refinar a especificidade dos resultados recuperados.

Na base Web of Science, a pesquisa foi conduzida com seleção do campo “Topics”. Na base Scopus, as buscas foram realizadas por meio da ferramenta “Document Search”, com seleção do campo “Article title, Abstract, Keywords”, assegurando a recuperação de estudos diretamente relacionados ao escopo da revisão.

A Tabela 1 apresenta a síntese dos termos de busca empregados, bem como as combinações booleanas utilizadas em cada base de dados.

**Tabela 1 –** estratégias de busca utilizadas nas bases de dados selecionadas

| Base de dados | Campo/filtro | Termo de busca adotado | N° de artigos |
|---|---|---|---|
| **Web of Science** | "Web of science Core Collection", filtro de busca "Topics" | ("electrodeposition" OR "electroplating" OR "electrochemical deposition" OR "electrodeposited") AND ("Ni-Mn" OR "Nickel-Manganese") | 193 |
| **Scopus** | "Search documents" filtro de busca "Article Title, Abstract, Keywords" | | 181 |

Fonte: elaborado pelos autores.

Os registros obtidos foram posteriormente exportados e analisados por meio do software VOSviewer, com o objetivo de identificar, por meio da análise de coocorrência de palavras-chave, as técnicas de caracterização mais utilizadas e as tendências de aplicações dessas ligas. Em seguida, foi realizada uma análise exploratória de tendências bibliométricas nas próprias bases de dados, considerando indicadores como a evolução do número de publicações ao longo do período analisado (2015–2025) e a distribuição geográfica das publicações, identificando os países com maior volume de produção científica relacionada ao tema.

Posteriormente, os estudos recuperados foram submetidos às etapas de triagem, elegibilidade e inclusão, conforme recomendado pelas diretrizes do protocolo PRISMA. Os critérios estabelecidos estão apresentados de forma detalhada na Tabela 2, os quais foram aplicados durante o processo de seleção dos artigos para garantir a relevância e a consistência metodológica da revisão.

**Tabela 2 -** Critérios de inclusão e exclusão adotados para seleção dos artigos

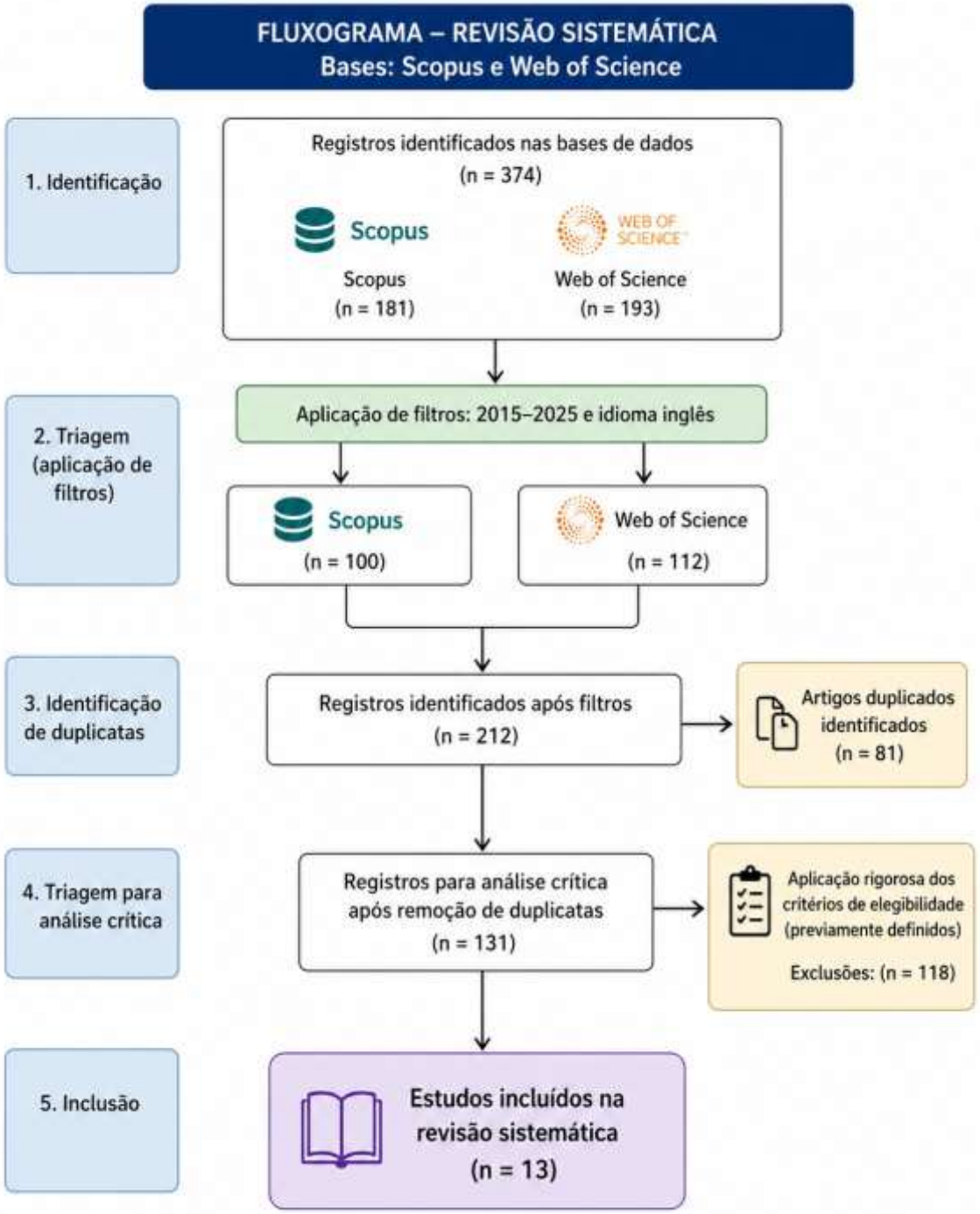
| Inclusão | Exclusão |
|---|---|
| **Publicações em base de dados renomadas (Web of Science e Scopus)** | Duplicidade em ambas as bases de dados |
| **Publicações no idioma inglês** | Artigos escritos em outro idioma que não o inglês |
| **Publicações no período de 2014 a 2025** | Publicações em período diferente ao estipulado na busca |
| **Relacionados a eletrodeposição de manganês, com aplicações em evolução de hidrogênio (HER)** | Artigos com outros métodos de produção e que a liga produzida esteja relacionada a outras aplicações |

Fonte: elaborado pelos autores.

Após a remoção de duplicatas e a aplicação rigorosa dos critérios previamente definidos, o conjunto final foi composto por 13 estudos, os quais foram considerados adequados para a análise qualitativa e discussão no presente trabalho.

O fluxograma que descreve detalhadamente as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos é apresentado na Figura 1, em conformidade com as recomendações do protocolo PRISMA.

**Figura 1 –** Fluxograma com as etapas de identificação, triagem e elegibilidade



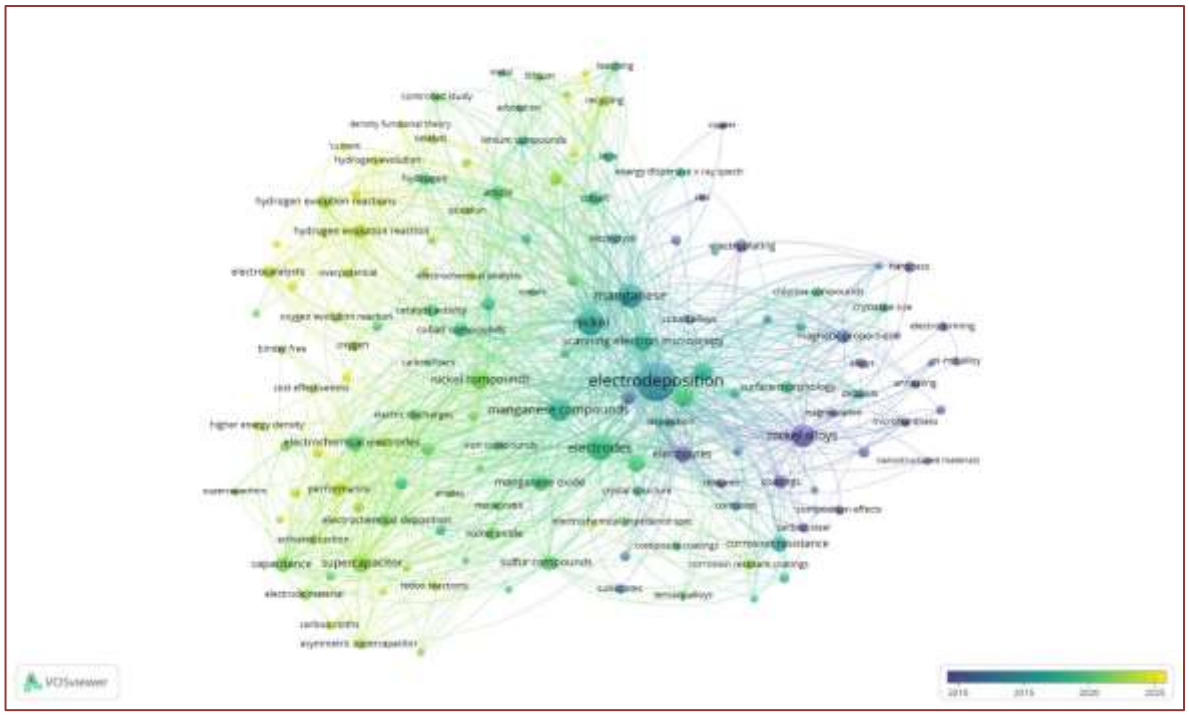

Fonte: elaborado pelos autores.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise bibliométrica de coocorrência de palavras-chave, realizada por meio do software VOSviewer (Figura 2), agrupou os termos em cores diferentes relacionadas com os anos de publicação. Percebe-se que no período de 2010 a 2015 as publicações relacionadas as ligas Ni-Mn focavam na avaliação da resistência a corrosão e propriedades magnéticas e dentre a técnicas mais utilizadas estão a de microdureza, EDX, MEV e

magnetização. A partir de 2020 observa-se a ocorrência de várias palavras relacionadas a produção de hidrogênio, como reação de evolução de hidrogênio, reação de evolução de oxigênio, atividade catalítica e supercapacitor. Essa tendência está provavelmente relacionada a urgência e necessidade da mudança da matriz energética.

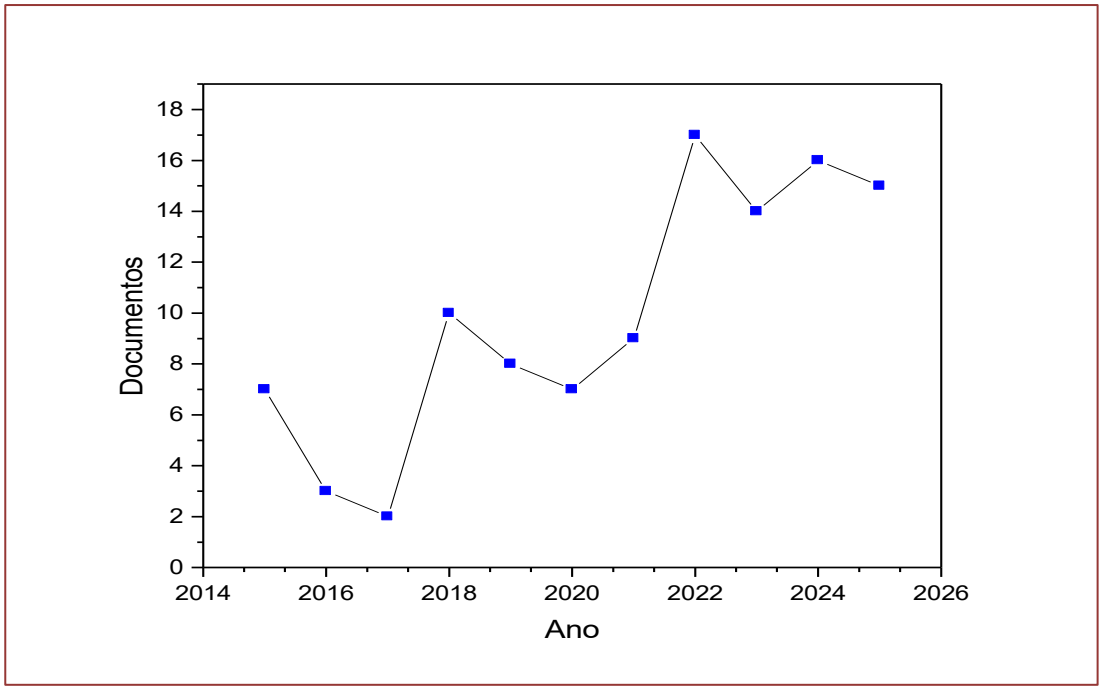
**Figura 2 -** Co-ocorrências de palavras-chave, análise pelo software VOSviewer




Fonte: elaborado pelos autores.

Após a realização da busca inicial e a aplicação do filtro referente ao período de publicação (2015–2025), foi conduzida uma análise quantitativa preliminar diretamente na base de dados. A Figura 3 apresenta a evolução do número de publicações relacionadas ao manganês ao longo do período analisado (2015-2025), com base nos registros recuperados na base Scopus.

**Figura 3 -** Evolução do número de publicações relacionadas a liga Ni-Mn ao longo do período analisado (2015–2025)



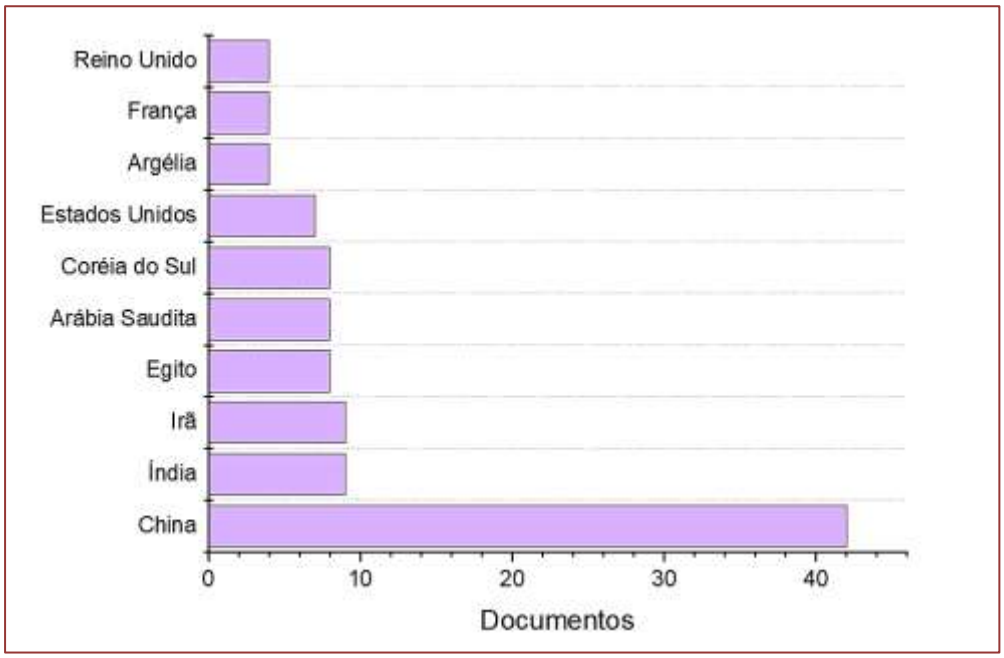

Fonte: elaborado pelos autores.

Observa-se uma tendência crescente no número de estudos relacionados à eletrodeposição de manganês e de suas ligas, indicando o aumento do interesse científico por esse elemento no contexto de aplicações eletroquímicas. De acordo com Wang *et al.* (2023), o manganês ocupa a 12ª posição em abundância na crosta terrestre e apresenta ampla aplicação em áreas como metalurgia, construção civil, eletrônica, medicina e agricultura.

Essa característica torna o manganês particularmente relevante para o desenvolvimento de novos materiais eletrocatalíticos, especialmente no contexto da substituição parcial ou total de metais nobres, como irídio (Ir), rutênio (Ru) e platina (Pt), tradicionalmente empregados em processos eletroquímicos. A busca por elementos mais abundantes, acessíveis e economicamente viáveis tem se intensificado nos últimos anos, impulsionada pela necessidade de desenvolver tecnologias mais sustentáveis para aplicações energéticas.

A Figura 4 apresenta a distribuição do número de artigos publicados por país. Observa-se que a China lidera significativamente a produção científica relacionada ao estudo da liga Ni-Mn, o que pode estar associado ao fato de o país ser atualmente um dos maiores produtores e exportadores de manganês no mundo, conforme relatado por Wang *et al.* (2023).

**Figura 4 -** Distribuição geográfica das publicações relacionadas a liga Ni-Mn no período de 2015-2025




Fonte: elaborado pelos autores.

Além disso, a China tem incorporado o hidrogênio como elemento estratégico em suas políticas nacionais de descarbonização industrial. Atualmente, o país figura entre os maiores produtores de hidrogênio do mundo e estabeleceu metas ambiciosas para a expansão da produção de hidrogênio verde, prevendo atingir aproximadamente 7,7 milhões de toneladas por ano até 2030.

Esse contexto ajuda a explicar o cenário observado nas análises bibliométricas, especialmente o destaque da China na produção científica apresentada na Figura 3. O forte investimento em tecnologias relacionadas ao hidrogênio e à transição energética tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas voltadas para novos materiais e catalisadores, incluindo ligas contendo manganês, o que contribui para a elevada quantidade de publicações provenientes desse país.

Além da análise bibliométrica, os 13 estudos selecionados foram organizados de forma sistemática segundo periódico de publicação, título e número de identificação, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 -** Conjunto de artigos relacionados a eletrodeposição das ligas Ni-Mn

| ID | Jornal | Título | Ano |
|---|---|---|---|
| A01 | Applied Surface Science | Effects of glycine and current density on the mechanism of electrodeposition, composition and properties of Ni–Mn films prepared in ionic liquid | 2016 |
| A02 | Journal of The Electrochemical Society | Ni-$Mn_3O_4$ Composite Coating by Electrophoresis/Electrodeposition for Metallic Interconnects Applications | 2019 |
| A03 | Coatings | Wear Resistance of Electrodeposited Ni–Mn–SiC Composite Coatings | 2021 |
| A04 | ACS Applied Energy Materials | Thermoelectric-Powered Supercapacitors Based on Ni–Mn Nanowires Driven by Quadripartite Electrolyte | 2022 |
| A05 | Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces | Characterization and Corrosion Protection Properties of Electrodeposited Zn–Ni–Mn Coatings | 2023 |
| A06 | Journal of Alloys and Compounds | Effects of annealing on the structure and microhardness of nanocrystalline Ni–Mn electrodeposits | 2023 |
| A07 | Journal of Materials Science: Materials in Electronics | Electrodeposited Ni–Mn thin films: an investigation on the structural, microstructural, composition, and magnetic properties | 2023 |
| A08 | Renewable Energy | Enhanced electrocatalytic activity of Ni-Mn-Co-Fe alloys for efficient hydrogen and oxygen evolution reactions: A study on the effects of electrodeposition parameters | 2024 |
| A09 | International Journal of Hydrogen Energy | 3D Nickel–Manganese bimetallic electrocatalysts for an enhanced hydrogen evolution reaction performance in simulated seawater/alkaline natural seawater | 2024 |
| A10 | Nanoscale | Sustainable and energy-saving hydrogen production via binder-free and in situ electrodeposited Ni–Mn–S nanowires on Ni–Cu 3-D substrates | 2025 |
| A11 | International Journal of Hydrogen Energy | Precise electronic modulation coupled with dual-structure design synergistically enhances the hydrogen evolution performance of NiMnP electrocatalysts | 2025 |
| A12 | Russian Journal of Electrochemistry | Effect of Manganese Content on the Electrodeposition and Corrosion Protection Properties of Ni–Mn Coatings | 2025 |
| A13 | Fuel | Ultra-fast one-step electrochemical synthesize of Ni-Mn-P as an active and stable electrocatalyst for green hydrogen production | 2025 |

Fonte: elaborado pelos autores.

O trabalho A01 Guo *et al.*, (2016) investiga a eletrodeposição de filmes de liga Ni–Mn utilizando um líquido iônico composto por cloreto de colina e ureia. Os pesquisadores analisaram como a adição de glicina e a variação da densidade de corrente influenciam a composição química, a morfologia superficial e a resistência à corrosão desses revestimentos. Os resultados demonstram que a glicina atua como um agente complexante que estabiliza o banho, aumenta o teor de manganês e refina a estrutura do grão. Observou-se que filmes com 3,1% de manganês apresentam propriedades anticorrosivas superiores ao níquel puro em soluções salinas. O estudo conclui que o uso de aditivos orgânicos permite a transição para um modo de crescimento mais uniforme e compacto.

O estudo A02 Zhu *et al*., (2019) detalha o desenvolvimento de um revestimento composto de Ni-Mn3O4 aplicado em interconectores de aço para células a combustível de óxido sólido através de eletroforese e eletrodeposição. Os pesquisadores identificaram que uma temperatura de 45°C e um pH 5 são as condições ideais para garantir a distribuição uniforme de partículas e a espessura adequada da camada protetora. Após testes de oxidação a 800°C, o revestimento converteu-se em uma estrutura de espinélio $(Ni,Mn,Fe)_3O_4$, que reduziu drasticamente a resistência elétrica em comparação ao aço não tratado. Essa camada resultante funciona como uma barreira eficiente, impedindo a migração de cromo, um fenômeno prejudicial ao desempenho das células. Em suma, a técnica oferece uma solução econômica para aumentar a durabilidade e a condutividade de componentes metálicos operando em altas temperaturas.

Shi *et al.,* 2021 desenvolveram o trabalho A03 que demonstrou a melhora da resistência ao desgaste em superfícies de aço tipo 45 através da aplicação de revestimentos de Ni–Mn–SiC via eletrodeposição. A pesquisa analisa inicialmente como diferentes concentrações de citrato de sódio influenciam a morfologia e a dureza da liga, identificando que o nível ideal de 40 g/L maximiza o desempenho mecânico. Posteriormente, partículas de SiC foram incorporadas para criar um revestimento composto, resultando em uma integridade superficial superior e refinamento de grãos. Os resultados demonstram que a adição de 4 g/L de SiC eleva a microdureza em 25% comparado à liga pura, reduzindo significativamente o desgaste.

O artigo A04 Verma; Padha; Arya, (2022) descreve o desenvolvimento de um supercapacitor simétrico inovador capaz de converter calor residual em energia elétrica. Os pesquisadores utilizaram a técnica de deposição eletroquímica para criar eletrodos baseados em nanofios de níquel-manganês, integrados a um eletrólito em gel quadripartido que atua tanto como meio de armazenamento quanto como material termoelétrico. O dispositivo demonstrou alta capacidade de armazenamento e densidade de energia, mantendo estabilidade excepcional após milhares de ciclos de uso. Ao aproveitar o gradiente de temperatura para autocarregamento, a tecnologia elimina a necessidade de fontes externas como painéis solares. Essa inovação é especialmente promissora para aplicações espaciais e satélites, onde a gestão de cargas térmicas e a leveza dos componentes são cruciais.

O trabalho A05 foi desenvolvido por Aouissi *et al.*, (2023) e trata da liga Zn–Ni–Mn obtida via eletrodeposição para proteger substratos de cobre contra a degradação corrosiva. Os pesquisadores analisaram como diferentes concentrações de manganês e potenciais elétricos influenciam a formação e o crescimento dos núcleos metálicos na superfície. Resultados estruturais revelaram uma morfologia compacta composta pelas fases η-Zn e $NiZn_3$, que são fundamentais para o aumento da durabilidade do material. Testes eletroquímicos demonstraram que a amostra com baixo teor de manganês (1,6 wt%) oferece a melhor resistência, criando uma camada passiva eficaz em ambientes agressivos.

O artigo A06 de Yang *et al.*, (2023) investiga como a adição de manganês e o processo de recozimento influenciam a estrutura e a dureza de depósitos de níquel nanocristalino. Os resultados demonstraram que a liga de Ni-Mn possui maior estabilidade térmica e dureza em comparação ao níquel puro, que sofre amolecimento e crescimento de grãos em temperaturas elevadas. Notavelmente, a liga apresentou um fenômeno de endurecimento induzido pelo recozimento entre 300 °C e 350 °C. Os autores atribuem essa resistência à formação de contornos de macla e ao relaxamento dos contornos de grão, em vez da segregação de soluto. O estudo conclui que

o manganês é eficaz para manter as propriedades mecânicas do material em condições de alta temperatura.

O estudo A07 Roshini *et al.*, (2023) detalha a produção de filmes finos magnéticos de Ni–Mn através da técnica de eletrodeposição, utilizando um substrato de cobre e variando a temperatura do banho eletrolítico. Os pesquisadores analisaram como a temperatura influencia a espessura da camada, a composição química e as propriedades estruturais das amostras. Foi observado que o aumento da temperatura resulta em filmes mais espessos, porém com tamanhos de cristalito reduzidos, o que altera significativamente a morfologia da superfície. As medições magnéticas revelaram um comportamento de magnetismo suave, apresentando uma correlação direta entre a espessura do filme e a magnetização de saturação. O trabalho demonstrou que o controle das condições experimentais permite ajustar as características físicas e magnéticas desses materiais para aplicações em sensores e dispositivos de armazenamento de dados.

Belhani *et al.*, (2024) desenvolveram o trabalho A08 que trata de um eletrocatalisador composto por uma liga de Ni-Mn-Co-Fe, sintetizada através do método de eletrodeposição. O estudo foca na criação de um material de baixo custo e alta eficiência para facilitar as reações de evolução de hidrogênio (HER) e oxigênio (OER) em ambientes alcalinos. Os pesquisadores analisaram como diferentes parâmetros, como temperatura, pH e composição do banho, influenciam a estrutura e o desempenho eletroquímico do material. Os resultados demonstram que a liga quaternária supera sistemas metálicos simples ou binários, exibindo estabilidade e alta condutividade para a quebra da molécula de água. O dispositivo final operou como um eletrodo bifuncional, exigindo uma voltagem reduzida para produzir energia limpa de forma sustentável.

O trabalho A09 Barua *et al.*, (2024) descreve o desenvolvimento de eletrocatalisadores bimetálicos de níquel-manganês (NiMn) com estrutura 3D para a produção sustentável de hidrogênio via eletrólise da água do mar. Os pesquisadores utilizaram uma técnica de deposição eletroquímica simples e de baixo custo sobre substratos de titânio, criando uma arquitetura porosa que maximiza os locais ativos para a reação. Os resultados demonstram que esses materiais possuem alta eficiência e estabilidade, superando desafios comuns como a corrosão causada por íons de cloreto e a formação de resíduos insolúveis. O estudo destaca que a configuração NiMn/Ti-5 apresentou o melhor desempenho, operando com baixos sobrepotenciais tanto em água do mar simulada quanto em água natural alcalinizada. Essa inovação representa um avanço promissor para viabilizar tecnologias de energia limpa em escala industrial, reduzindo a dependência de recursos escassos de água doce.

O artigo A10 de Darband *et al.*, (2025) trata do desenvolvimento de um eletrocatalisador composto por nanofios de Ni–Mn–S depositados sobre um substrato tridimensional de Ni–Cu para a produção de hidrogênio sustentável. Os pesquisadores utilizaram uma técnica de eletrodeposição em duas etapas, livre de aglutinantes, para criar uma estrutura que otimiza a área de superfície e a condutividade elétrica. O estudo focou na substituição da lenta reação de evolução de oxigênio pela oxidação da ureia, o que reduz significativamente o consumo de energia e permite o tratamento de águas residuais. Os resultados demonstraram que o eletrodo otimizado possui alta estabilidade e eficiência, alcançando baixos potenciais para as reações de eletrólise em meios alcalinos. Dessa forma, a pesquisa apresenta uma solução de baixo custo e alto desempenho para a geração de combustível limpo.

Chen *et al.*, (2025) estudaram um eletrocatalisador de NiMnP para a produção sustentável de hidrogênio por meio da eletrólise da água. Os pesquisadores utilizaram a técnica de eletrodeposição para incorporar manganês ao fosfeto de níquel, resultando em uma estrutura amorfa que otimiza a transferência de elétrons e a adsorção de intermediários. Essa modificação química criou uma morfologia única de "filme fino e aglomerados de partículas", que amplia a área de superfície e expõe mais sítios ativos para a reação. O catalisador otimizado demonstrou um baixo sobrepotencial e uma estabilidade operacional de até 100 horas em meios alcalinos. Além disso, o estudo comprova a viabilidade industrial do material ao integrá-lo em um sistema completo de decomposição da água, superando diversos catalisadores de metais não nobres existentes.

O trabalho A12 de Lamaa Aouissi *et al.*, (2025) investiga a eletrodeposição de revestimentos de Ni–Mn sobre substratos de cobre, analisando como a concentração de manganês e o potencial aplicado influenciam a formação da liga. Por meio de modelos matemáticos e técnicas avançadas de microscopia, os autores confirmaram que o manganês se integra à estrutura do níquel, criando uma solução sólida que altera a morfologia da superfície. Os resultados demonstram que a inclusão de uma pequena quantidade de manganês aumenta significativamente a resistência à corrosão, especialmente na composição Ni96.9Mn1.5. Ensaios eletroquímicos revelaram que essa proteção ocorre devido à formação de uma camada passiva de óxidos composta por MnO2 e Ni(OH)Cl. Contudo, o excesso de manganês pode induzir tensões residuais e fissuras que comprometem a durabilidade do material.

Por fim o artigo A13 de Talebi e Barati Darband (2025) detalha o desenvolvimento de um eletrocatalisador de Ni-Mn-P de alto desempenho, sintetizado sobre espuma de níquel para a produção de hidrogênio verde. Através de uma técnica de eletrodeposição em etapa única, os pesquisadores criaram nanoestruturas em formato de folhas que ampliam a área de superfície ativa e aceleram a reação de evolução do hidrogênio. Os resultados demonstraram que a inclusão de manganês e fósforo otimiza a estrutura eletrônica do material, reduzindo significativamente o consumo de energia e a resistência à transferência de carga. Além da eficiência superior, o catalisador exibiu uma estabilidade excepcional, mantendo sua integridade estrutural e funcional por até 100 horas de operação contínua.

## 4.1. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A análise dos artigos A01 a A13 evidencia uma diversidade de abordagens no processo de eletrodeposição de ligas e revestimentos de Ni–Mn, variando conforme a aplicação pretendida, seja para proteção contra corrosão ou para eletrocatálise. A seguir, apresenta-se uma comparação estruturada com base na composição do banho eletrolítico, temperatura, pH e condições eletroquímicas (densidade de corrente ou potencial).

Com relação aos componentes do banho, a maioria dos estudos utiliza sistemas aquosos baseados em sulfatos (como sulfato de níquel e sulfato de manganês) ou cloretos. Em diversos trabalhos, observa-se o uso de agentes complexantes e aditivos, justificado pela significativa diferença entre os potenciais de redução do níquel e do manganês, o que dificulta a codeposição. Nesse contexto, o uso de complexantes é fundamental para aproximar esses potenciais. O citrato de sódio (ou de amônio) destaca-se como o agente mais recorrente. Outros aditivos incluem a glicina, empregada em sistemas com líquidos iônicos para controle morfológico, e a sacarina, utilizada para reduzir tensões internas e

promover o refinamento de grão. O trabalho A01 diferencia-se por empregar um líquido iônico (mistura eutética de cloreto de colina e ureia), que proporciona uma janela eletroquímica mais ampla e minimiza a evolução de hidrogênio típica de sistemas aquosos.

A temperatura operacional varia conforme o sistema eletrolítico e o objetivo da microestrutura:

- Temperatura ambiente (≈25 °C): adotada em estudos voltados à eletrocatálise e revestimentos convencionais, priorizando simplicidade operacional e menor custo;
- Temperatura moderada (35–60 °C): utilizada para otimizar a cinética de deposição e a qualidade do revestimento. Por exemplo, em A02, a temperatura de 45 °C favoreceu a incorporação homogênea de partículas de $Mn_3O_4$, enquanto em A03, 60 °C foi empregada na obtenção de compósitos Ni–Mn–SiC;
- Temperatura elevada (≈70 °C): aplicada em sistemas com líquidos iônicos para reduzir a viscosidade e aumentar a condutividade, ou em banhos específicos para elevar a solubilidade dos sais e a taxa de deposição.

Com relação ao pH, seu controle é essencial para evitar a precipitação de hidróxidos metálicos e regular a reação de evolução de hidrogênio (HER). De modo geral, predomina a faixa ácida (pH 1,0–5,0), sendo valores próximos a 3,5 frequentemente reportados para ligas Ni–Mn e Zn–Ni–Mn. O ácido bórico é amplamente utilizado como agente tamponante, contribuindo para a estabilização do pH na interface catódica. Quanto às condições eletroquímicas, os estudos empregam tanto o modo galvanostático (controle de densidade de corrente) quanto o potenciostático (controle de potencial), dependendo do objetivo experimental — seja o controle da taxa de deposição ou a investigação dos mecanismos de nucleação e crescimento.

- Baixas densidades de corrente (1–20 mA $cm^{-2}$): utilizadas na obtenção de filmes finos e revestimentos uniformes, especialmente para proteção contra corrosão;
- Altas densidades de corrente (0,1–2 A $cm^{-2}$): empregadas em estudos como A10 e A13 para a formação de estruturas porosas (dendríticas ou nanofolhas), via técnica de moldagem dinâmica por bolhas de hidrogênio, relevante para aplicações eletrocatalíticas;
- Modo potenciostático: potenciais entre −0,8 e −1,4 V (vs. Ag/AgCl) são frequentemente aplicados para investigar os estágios iniciais de nucleação e crescimento tridimensional.

Em síntese, os estudos voltados à proteção contra corrosão (A02, A03, A05, A06, A07, A12) priorizam banhos com aditivos de refinamento de grão e temperaturas moderadas, visando uniformidade e estabilidade dos revestimentos. Por outro lado, os trabalhos focados em eletrocatálise (A08, A09, A10, A11, A13) tendem a explorar condições mais extremas de deposição e estratégias de modificação química (como dopagem com P ou S), com o objetivo de maximizar a atividade catalítica na reação de evolução de hidrogênio.

## 5. CONCLUSÃO

Com base na análise sistemática da literatura sobre a eletrodeposição de ligas Ni–Mn no período de 2015 a 2025, observa-se uma evolução no direcionamento das pesquisas, que migraram de um enfoque tradicional em propriedades magnéticas e resistência à corrosão para aplicações em eletrocatálise, especialmente na produção de hidrogênio via eletrólise.

A análise revelou que a utilização de sais de níquel e manganês em meio aquoso, frequentemente associados a agentes complexantes como citratos, mostrou-se essencial para viabilizar a codeposição, considerando a diferença significativa entre os potenciais de redução desses metais. Adicionalmente, o controle de parâmetros como pH, temperatura e densidade de corrente exerce influência direta na morfologia, composição e desempenho funcional dos revestimentos obtidos.

De modo geral, verificou-se a predominância de meios ácidos (pH entre 1,0 e 5,0), temperaturas moderadas (25–60 °C) e diferentes regimes eletroquímicos (galvanostático e potenciostático), ajustados conforme a aplicação desejada. Estudos voltados à proteção contra corrosão priorizam condições que favorecem depósitos homogêneos e compactos, enquanto aplicações eletrocatalíticas exploram condições mais severas, visando estruturas porosas e alta área superficial.

A análise bibliométrica indicou um crescimento expressivo no número de publicações recentes, com destaque para a liderança da China na produção científica, o que pode ser associado tanto à disponibilidade de manganês quanto às políticas voltadas à transição energética e ao hidrogênio verde.

Apesar dos avanços observados, a literatura ainda apresenta lacunas relevantes, especialmente no que diz respeito à padronização dos parâmetros de deposição e à correlação sistemática entre condições de síntese e desempenho eletrocatalítico.

## REFERÊNCIAS

[1] ALIOFKHAZRAEI, M. *et al.* Development of electrodeposited multilayer coatings: A review of fabrication, microstructure, properties and applications. **Applied Surface Science Advances**, v. 6, p. 100141, 1 dez. 2021.

[2] AOUISSI, Lamaa *et al.* Characterization and Corrosion Protection Properties of Electrodeposited Zn–Ni–Mn Coatings. **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces 2023 59:4**, v. 59, n. 4, p. 704–716, 13 set. 2023.

[3] BACHAGHA, T. *et al.* Microstructure characterization, structure and magnetic properties of Ni–Mn–Sn shape memory alloys. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 3, p. 2147–2154, 1 fev. 2022.

[4] BARUA, S. *et al.* 3D Nickel–Manganese bimetallic electrocatalysts for an enhanced hydrogen evolution reaction performance in simulated seawater/alkaline natural seawater. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 79, p. 1490–1500, 19 ago. 2024.

[5] BELHANI, Imadeddine *et al.* Enhanced electrocatalytic activity of Ni-Mn-Co-Fe alloys for efficient hydrogen and oxygen evolution reactions: A study on the effects of electrodeposition parameters. **Renewable Energy**, v. 237, p. 121688, 1 dez. 2024.

[6] BOZORTH, R. M. Atomic Moments of Ferromagnetic Alloys. **Physical Review**, v. 79, n. 5, p. 887, 1 set. 1950.

[7] CHEN, Guoxiang *et al.* Precise electronic modulation coupled with dual-structure design synergistically enhances the hydrogen evolution performance of NiMnP electrocatalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 172, p. 151262, 26 set. 2025.

[8] CHENG, Chuan *et al.* Simultaneous Enhancement of Actuation Strain and Mechanical Strength of Nanoporous Ni–Mn Actuators. **Advanced Electronic Materials**, v. 7, n. 7, p. 2100381, 1 jul. 2021.

[9] CHENG, Kuan Hui *et al.* Fabrication of Ni-Mn microprobe structure with low internal stress and high hardness by employing DC electrodeposition. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, 2014.

[10] CORREIA, A. N.; MACHADO, S. A. S. Electrodeposition and characterisation of thin layers of Ni□Co alloys obtained from dilute chloride baths. **Electrochimica Acta**, v. 45, n. 11, p. 1733–1740, 1 fev. 2000.

[11] DARBAND, Ghasem Barati *et al.* Sustainable and energy-saving hydrogen production via binder-free and in situ electrodeposited Ni–Mn–S nanowires on Ni–Cu 3-D substrates. **Nanoscale**, v. 17, n. 4, p. 2162–2173, 23 jan. 2025.

[12] ERGENEMAN, O. *et al.* Morphology, structure and magnetic properties of cobalt–nickel films obtained from acidic electrolytes containing glycine. **Electrochimica Acta**, v. 56, n. 3, p. 1399–1408, 1 jan. 2011.

[13] GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 7 ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

[14] GOODS, S. H.; KELLY, J. J.; YANG, N. Y. C. Electrodeposited nickel-manganese: An alloy for microsystem applications. **Microsystem Technologies**, v. 10, n. 6–7, p. 498–505, out. 2004.

[15] GUO, Jiacheng *et al.* Effects of glycine and current density on the mechanism of electrodeposition, composition and properties of Ni–Mn films prepared in ionic liquid. **Applied Surface Science**, v. 365, p. 31–37, 1 mar. 2016.

[16] JAFFEE, Robert I. The Magnetic Properties of Ordered Nickel-Manganese Alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 19, n. 10, p. 867–870, 1 out. 1948.

[17] KARIMZADEH, Abdossalam; ALIOFKHAZRAEI, Mahmood; WALSH, Frank C. A review of electrodeposited Ni-Co alloy and composite coatings: Microstructure, properties and applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 372, p. 463–498, 25 ago. 2019.

[18] KAYA, Seiji; KUSSMANN, A. Ferromagnetismus und Phasengestaltung im Zweistoffsystem Nickel-Mangan. **Zeitschrift für Physik**, v. 72, n. 5–6, p. 293–309, maio 1931.

[19] KELLY, J. J.; GOODS, S. H.; YANG, N. Y. C. High performance nanostructured Ni-Mn alloy for microsystem applications. **Electrochemical and Solid-State Letters**, v. 6, n. 6, jun. 2003.

[20] KIRTHIKA, P.; THANGARAJ, N. Effect of deposition time and bath temperature on Electrodeposited Nickel Manganese magnetic thin films. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 1361–1365, 1 jan. 2021.

[21] LAMAA AOUISSI *et al.* Effect of Manganese Content on the Electrodeposition and Corrosion Protection Properties of Ni–Mn Coatings. **Russian Journal of Electrochemistry 2025 61:10**, v. 61, n. 10, p. 681–693, 23 dez. 2025.

[22] LANDAU, Ralph; OLDACH, Carl S. Corrosion of Binary Alloys. **Transactions of The Electrochemical Society**, v. 81, n. 1, p. 521, 1 abr. 1942.

[23] LIN, Shengnan; ZHANG, Tingan. Electrochemical in-situ generation of Ni-Mn MOF nanomaterials as anode materials for lithium-ion batteries. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 942, p. 168926, 5 maio 2023.

[24] LIU, Jianguo *et al.* Fabrication of superhydrophobic coatings for corrosion protection by electrodeposition: A comprehensive review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 607, p. 125498, 20 dez. 2020.

[25] MALEKI, K.; SANJABI, S.; ALEMIPOUR, Z. AC electrodeposition of NiMn alloy nanowires in AAO template. **https://doi.org/10.1142/S0217979215502240**, v. 29, n. 31, 1 dez. 2015.

[26] MAZIARZ, W. *et al.* The evolution of microstructure and magneto-structural properties of heat treated ni-mn-sn-in heusler alloys sintered by vacuum hot pressing. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 64, n. 2, p. 727–732, 2019.

[27] MONICA, S. Esther Santhoshi *et al.* Nebulizer sprayed nickel-manganese (Ni-Mn) mixed metal oxide nanocomposite coatings for high-performance electrochromic device applications. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 26, n. 5, p. 1271–1290, 1 maio 2022.

[28] RAJESWARI, M. *et al.* Characterization of electrodeposited nanocrystalline Ni-Mn thin films for MEMS applications. **JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS**, v. 16, n. 6, p. 640–644, 2014.

[29] ROSHINI, A. *et al.* Electrodeposited Ni–Mn thin films: an investigation on the structural, microstructural, composition, and magnetic properties. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics 2023 34:31**, v. 34, n. 31, p. 2088-, 4 nov. 2023.

[30] RUIZ-GÓMEZ, Sandra; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Claudia; PEREZ, Lucas. Electrodeposition as a Tool for Nanostructuring Magnetic Materials. **Micromachines 2022, Vol. 13, Page 1223**, v. 13, n. 8, p. 1223, 30 jul. 2022.

[31] SAFAVI, Mir Saman *et al.* Electrodeposited Ni-Co alloy-particle composite coatings: A comprehensive review. **Surface and Coatings Technology**, v. 382, p. 125153, 25 jan. 2020.

[32] SANTANA, Renato Alexandre Costa de. **OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO DAS LIGAS Co-Mo E Ni-Co-Mo PARA MITIGAR O EFEITO DA CORROSÃO**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

[33] SATO, Takao. Some Properties of the Ni-Mn Alloys of Intermediate Composition (I). **Journal of The Physical Society of Japan**, v. 6, n. 4, p. 223–227, jul. 1951.

[34] SHARMA, Amit *et al.* Correlation between crystallographic texture, microstructure and magnetic properties of pulse electrodeposited nanocrystalline Nickel–Cobalt alloys. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 434, p. 68–77, 15 jul. 2017.

[35] SHI, Xiaoxin *et al.* Wear Resistance of Electrodeposited Ni–Mn–SiC Composite Coatings. **Coatings 2021, Vol. 11,** v. 11, n. 1, p. 1–17, 8 jan. 2021.

[36] SIDES, William D.; HUANG, Qiang. Electrodeposition of manganese thin films on a rotating disk electrode from choline chloride/urea based ionic liquids. **Electrochimica Acta**, v. 266, p. 185–192, 10 mar. 2018.

[37] TALEBI, Ali; BARATI DARBAND, Ghasem. Ultra-fast one-step electrochemical synthesize of Ni-Mn-P as an active and stable electrocatalyst for green hydrogen production. **Fuel**, v. 397, p. 135427, 1 out. 2025.

[38] THANIKAIKARASAN, S. *et al.* Role of substrate on film thickness, structural, compositional and magnetic properties of CoNi alloy thin films by low temperature electrodeposition technique. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 24, n. 12, p. 955–962, 1 dez. 2020.

[39] VAYENAS, C. G.; WHITE, Ralph E.; GAMBOA-ALDECO, Maria E. **Modern aspects of electrochemistry. No. 42**. *[S.l.]*: Springer Science & Business Media, 2008.

[40] VERMA, Sonali; PADHA, Bhavya; ARYA, Sandeep. Thermoelectric-Powered Supercapacitors Based on Ni-Mn Nanowires Driven by Quadripartite Electrolyte. **ACS Applied Energy Materials**, v. 5, n. 7, p. 9090–9100, 25 jul. 2022.

[41] YAMASHITA, Jiro; ASANO, Setsuro; WAKOH, Shinya. Electronic Structure of Ni-Mn Alloys. **Progress of Theoretical Physics**, v. 47, n. 3, p. 774–789, 1 mar. 1972.

[42] YANG, Xuejia *et al.* Effects of annealing on the structure and microhardness of nanocrystalline Ni–Mn electrodeposits. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 960, p. 170732, 15 out. 2023.

[43] ZHU, Huimin *et al.* Ni-Mn3O4 Composite Coating by Electrophoresis/Electrodeposition for Metallic Interconnects Applications. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 6, p. F423, 15 abr. 2019.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson